

(баланс). Для этого в них, соответственно, запишем формулы =СУММ(L56:L58) и =СУММ(M56:M58). Формируем информационное обрамление таблицы. В результате получим:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
52		Нач ост дебет	Нач ост кред	С кредита в дебет			Деб обо- рот	С дебета в кредит			Кредит овый оборот	Кон остат дебет	Кон остат кредит
53	Пред- прия- тия			A	B	C		A	B	C			
54	A	200	-	-	2200	-	2200	-	-	1000	1000	1400	-
55	B	-	100	-	-	100	100	2200	-	-	2200	-	2200
56	C	-	100	1000	-	-	1000	-	100	-	100	800	-
57											Итого	2200	2200

Реализация рассмотренной модели на **Excel** имеет одно существенное достоинство – при изменении корреспонденций в исходной таблице или при добавлении новых корреспонденций автоматически пересчитывается итоговая таблица. Фактически получена автоматизированная система подведения взаимозачетов между предприятиями.

Рассмотренная модель взаимозачетов может служить основой для автоматизации бухгалтерского учета. Действительно, отдельные счета выполняют роль аналогичную предприятиям в рассмотренной модели. Но для бухгалтерского учета разрешены не все возможные корреспонденции. Кроме того для большинства счетов сальдо должно быть или активным, то есть с плюсом, или пассивным, то есть с минусом. Реализация этих ограничений даже средствами *Excel* не вызывает особых затруднений.

---

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ПОЛЕЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК. 621.396.96 (078.5)

### МЕТОД ПОЛНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА

*Б.В. Храбростин*

Поиск новых путей повышения информативности и помехозащищённости РЛС, как адекватный ответ на потребности практики, вынуждал исследователей многое переосмысливать, начиная с понятия класса целей, представления математических моделей полезных и мешающих сигналов, методов синтеза решающих правил и алгоритмов обнаружения, оценки координат и распознавания целей в сложной помеховой обстановке, а также принципов построения устройств и РЛС в целом. Одним из частных результатов такого переосмысливания явился новый метод радиолокации — полное поляризационное зондирование пространства (ППЗП) [9, 12–14]. Этот метод предназначен для обнаружения, оценки координат и распознавания радиолокационных целей преимущественно на фоне пассивных, активных и комбинированных помех,

воздействующих на радиолокационную станцию (РЛС) по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

Понятие "полное поляризационное зондирование пространства (целей)" было введено около 15 лет назад по аналогии с понятием "полный поляризационный прием" и предполагало измерение в процессе зондирования пространства поляризационных матриц рассеяния (ПМР) объектов на одной или нескольких частотах и их использование для решения традиционных задач радиолокации. Новое понятие позволило выделить метод, который использует для обнаружения, оценки координат и распознавания целей векторные сигналы, составленные из элементов ПМР этих целей. Такие векторные сигналы были названы поляризационными векторами рассеяния (ПВР) объектов [7–9]. Переход от матричного описания рассеивающих свойств объектов к векторному позволил сравнительно просто распространить развитый математический аппарат многомерного анализа и многие методы решения задач статистической теории традиционной радиолокации на случаи наиболее полного учета преобразований поляризации объектом. Это не только создало предпосылки для существенного увеличения производительности исследований самого нового метода, но и облегчило понимание их результатов широким кругом специалистов радиолокации с традиционной подготовкой. Как известно, в рамках традиционной подготовки изучению сущности и методов использования преобразований поляризации радиоволн объектами локализации отводилось и отводится весьма скромное место. В практике радиолокации поляризация радиоволн учитывалась и учитывается при решении хотя и важных, но преимущественно частных технических задач.

Новизна метода ППЗП обязана использованию неизвестных ранее закономерностей локализации распределений в поляризационном пространстве многомерных ортогонально поляризованных сигналов, соответствующих различным классам источников. Под поляризационным пространством понимается  $n$ -мерное пространство сигналов [1], в котором определяются совместные распределения ортогонально поляризованных компонентов сигналов, принимаемых радиолокатором в процессе ППЗП на одной или нескольких частотах. В математической терминологии такому пространству соответствует гильбертово пространство, то есть комплексное ( $C^n$ ) линейное пространство со скалярным произведением, являющимся полным метрическим пространством [3].

Ниже кратко обсуждается сущность новых закономерностей локализации в поляризационном пространстве распределений многомерных ортогонально поляризованных радиолокационных сигналов различных классов и результаты использования этих закономерностей.

### **Основные статистические свойства многомерных ортогонально поляризованных сигналов**

В процессе полного поляризационного зондирования пространства, наряду с сигналами, отраженными от целей, возможен прием сигналов активных источников по главному или боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. Поэтому различают [12–14]. ПВР — поляризационные векторы рассеяния радиоволн объектами заданного класса (сокращенно — ПВР объектов заданного класса) и ПВ АИ — поляризационные векторы активных источников электромагнитных волн (активных помех) заданного вида поляризации (сокращенно — ПВ АИ или ПВ АП заданного класса).

Для изучения основных статистических свойств ПВР и ПВ АП, связанных с локализацией их распределений в поляризационном пространстве, воспользуемся известными результатами многомерного статистического анализа.

Известно [1], что линейное многообразие  $L(\dot{\mathbf{S}})$ , в котором локализуется случайный вектор  $\dot{\mathbf{S}}$ , может быть представлено в виде направляющего подпространства  $E(\dot{\mathbf{M}})$ , образованного вектор-столбцами ковариационной матрицы  $\dot{\mathbf{M}}$  данного случайного вектора  $\dot{\mathbf{S}}$ , сдвинутого на вектор  $\dot{\mu}$  (математического ожидания  $\dot{\mathbf{S}}$ ), т.е.:

$$L(\dot{\mathbf{S}}) = E(\dot{\mathbf{M}}) + \dot{\mu} \quad (1)$$

Уместно заметить, что размерность линейного многообразия  $L(\dot{\mathbf{S}})$  равняется размерности его направляющего подпространства  $E(\dot{\mathbf{M}})$ , которая, в свою очередь, равна рангу  $r$  ковариационной матрицы  $\dot{\mathbf{M}}$  ( $\text{rg } \dot{\mathbf{M}} = r$ ) случайного вектора  $\dot{\mathbf{S}}$ . В дальнейшем линейное многообразие  $L(\dot{\mathbf{S}})$  будем называть плоскостью локализации ПВР (ПВ АП)  $\dot{\mathbf{S}}$  или короче  $r$ -плоскостью  $\dot{\mathbf{S}}$ .

Известно [1] также, что для нормального закона с математическим ожиданием  $\dot{\mu}$  и ковариационной матрицей  $\dot{\mathbf{M}}$  многомерному распределению  $\dot{\mathbf{S}}$  можно поставить в соответствие достаточно наглядную геометрическую интерпретацию, представляющую область его локализации в виде  $n$ -мерного "эллипсоида". В случае, если  $\text{rg } \dot{\mathbf{M}} = r < n$ , следует говорить о  $r$ -мерном "эллипсоиде". Центром этого "эллипсоида" будет  $\dot{\mu}$ , направления его главных осей совпадут с собственными векторами  $\dot{\mathbf{b}}_i$  ( $i = \overline{1, r}$ ) матрицы  $\dot{\mathbf{M}}$ , соответствующими ее ненулевым собственным значениям  $\eta_i$ , а длины полуосей будут определяться значениями  $\sqrt{C_0 \eta_i}$ . Выбирая  $C_0$  можно так задать размеры осей  $r$ -мерного "эллипсоида", чтобы вероятность того, что случайный вектор  $\dot{\mathbf{S}}$  будет находиться внутри такого  $r$ -мерного "эллипсоида", была не меньше заданной. Пологая эту заданную вероятность достаточно близкой к единице получим  $r$ -мерный "эллипсоид", который может служить приближенной моделью области локализации распределения случайного вектора  $\dot{\mathbf{S}}$  или, короче,— моделью области локализации  $\dot{\mathbf{S}}$ . Очевидно, что при такой геометрической трактовке термин "область локализации  $\dot{\mathbf{S}}$ " приобретает наглядность и конкретное содержание. Собственно, принципиальной необходимости в такой модели нет, однако инженеры привыкли мыслить геометрическими образами и хотя бы поэтому, с методической точки зрения, такая геометрическая интерпретация области локализации распределения ПВР цели заданного класса представляется целесообразной.

Из выражения (1) следует, что, первые два момента распределения  $\dot{\mathbf{S}}$  определяют положение  $r$ -плоскости  $\dot{\mathbf{S}}$ , а также размеры и ориентацию осей  $r$ -мерного "эллипсоида" в поляризационном пространстве, т.е. расположение, размерность и размеры области локализации распределения случайного вектора  $\dot{\mathbf{S}}$  в исходном поляризационном пространстве. В то время как высшие моменты определяют особенности концентрации распределения  $\dot{\mathbf{S}}$  в области локализации. Таким образом, в двух первых моментах распределения  $\dot{\mathbf{S}}$  содержится основная информация о статистических свойствах случайного вектора.

Нетрудно заметить, что выражение (1) с учетом его геометрической интерпретации как бы само по себе предопределяет возможный путь анализа статистических свойств ПВР и ПВ АП. Этот путь включает: оценку математического ожидания  $\dot{\mu}$  и поляризационно-ковариационной матрицы (ПКМ)  $\dot{\mathbf{M}}$  ПВР объектов или ПВ АП заданного класса; определение собственных значений и собственных векторов ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}$ ; анализ их зависимости от геометрических характеристик и ориентации объектов,

сравнение расположения и размеров областей локализации в поляризационном пространстве ПВР объектов и ПВ АП различных классов.

Теоретический анализ статистических свойств ПВР объектов заданных классов проведем, полагая, что объекты располагаются в дальней зоне радиолокатора, измерение их ПВР осуществляется на заданной частоте  $\omega$ , а ошибки измерения амплитуд и фаз компонентов ПВР отсутствуют.

К заданному классу объектов будем относить совокупность (представительную выборку) подобных по форме объектов, с одинаковым распределением проводимости по их поверхности и одинаково ориентированных относительно РЛС. Другими словами, объекты, объединяемые в класс, отличаются только размерами. При этом параметры статистических распределений ПВР объектов заданного класса на определенной несущей частоте РЛС при заданной ориентации объекта относительно поляризационного базиса РЛС будем определять путем усреднения по множеству объектов класса.

Для анализа рассеивающих свойств объекта удобно использовать сферическую систему координат с центром в условном центре объекта. При этом, если дальность до объекта полагать неизменной, то положение радиолокатора относительно объекта может быть определено двумя угловыми величинами  $\varphi$  и  $\Theta$ . В выбранной системе координат ПВР объекта может быть представлена в виде

$$\dot{S}(\vec{U}) = \left\| \begin{array}{cccc} \dot{S}_{11}(\vec{U}) & \dot{S}_{21}(\vec{U}) & \dot{S}_{12}(\vec{U}) & \dot{S}_{22}(\vec{U}) \\ \dot{S}_1(\vec{U}) & \dot{S}_2(\vec{U}) & \dot{S}_3(\vec{U}) & \dot{S}_4(\vec{U}) \end{array} \right\|^T = \quad (2)$$

где  $\dot{S}_y(\vec{U})$ ,  $(i, j = 1, 2)$  — компоненты ПМР;  $i$  — условное обозначение поляризации на прием;  $j$  — условное обозначение поляризации на передачу;  $\vec{U} = \|\omega \quad \varphi \quad \Theta\|^T$ .

Область изменения аргументов определим следующим образом:

$$D = (\omega \in \Delta\Omega; \quad 0 \leq \varphi < 2\pi; \quad 0 \leq \Theta < \pi). \quad (3)$$

Изучая основные закономерности локализации распределений ПВР объектов разных классов в поляризационном пространстве, вид поляризации радиолокатора можно не оговаривать по следующим причинам. Можно доказать инвариантность закона распределения ПВР к любому унитарному преобразованию поляризационного базиса, поскольку якобиан такого преобразования равен единице [8]. С другой стороны, унитарное преобразование поляризационного базиса является линейным, а известно [2], что линейное преобразование сигналов не изменяет их различимости. И, наконец, рассматривая процесс локации объектов с формальной точки зрения, можно сказать, что радиолокатор производит отображение совокупности свойств объекта в совокупность сигналов — компонентов ПВР  $\dot{S}(\vec{U})$  (2).

Пространство сигналов, в котором определен ПВР  $\dot{S}(\vec{U})$  мы назвали поляризационным пространством. Поскольку при фиксированном значении  $\vec{U}$  ПМР, а, следовательно, и ПВР объекта, содержит информацию, полностью определяющую преобразования поляризации целью [4], то размерность поляризационного пространства будет в данном случае равна 4 ( $n = 4$ ), т.е. равна размерности ПВР. Оси системы координат, определенной в этом пространстве, поставим в соответствие компонентам ПВР  $\dot{S}(\vec{U})$ , измеренным в заданном поляризационном базисе РЛС. Выбранную таким образом систему координат назовем исходной.

Известные в настоящее время математические модели ПВР объектов сравнительно простой формы, позволяют получать необходимые результаты аналитическими методами. В частности, при круговых поляризациях РЛС, решения характеристического уравнения ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_c$  для класса сфер определяют собственные значения  $\dot{\mathbf{M}}_c$  в виде:

$$\eta_1 = 2\sigma_c; \quad \eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_c = \frac{1}{2} \langle \dot{\mathbf{S}}_c \dot{\mathbf{S}}_c^* \rangle$  — средняя эффективная отражающая поверхность (ЭПР) объектов класса сфер;

$\dot{\mathbf{S}}_c$  — коэффициент отражения на собственной поляризации сферы;

$\langle \dots \rangle$  — знак статистического усреднения;

\* — знак комплексного сопряжения.

Нормированный собственный вектор ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_c$ , соответствующий единственному, отличному от нуля, собственному значению  $\eta_1$  будет равен:

$$\mathbf{b}_{c1}^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \| 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \|^T \quad (5)$$

В случае линейных поляризаций РЛС собственные значения и единственный нормированный собственный вектор ПКМ класса сфер будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} \eta_{c1L} = 2\sigma_c; \quad \eta_{c2L} = \eta_{c3L} = \eta_{c4L} = 0; \\ \mathbf{b}_{cL}^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \| 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \|^T \end{aligned} \quad (6)$$

Приведенные результаты (4–6) свидетельствуют о том, что область локализации ПВР класса сфер одномерна, причем соответствующая линия лежит на биссектрисе угла между осями координат координатной плоскости  $\dot{\mathbf{S}}_{21}O\dot{\mathbf{S}}_{12}$  (при круговых поляризациях РЛС, см. выражение 5) или плоскости  $\dot{\mathbf{S}}_{11}O\dot{\mathbf{S}}_{22}$  (при линейных поляризациях РЛС, см. выражение 6 и рис.1.)

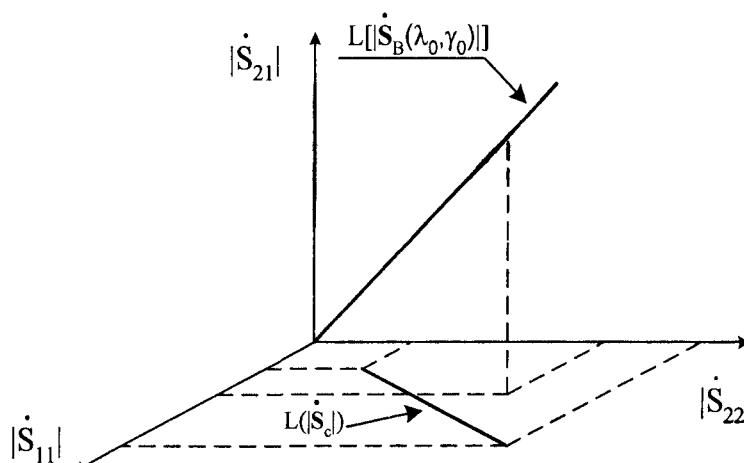


Рис 1. Области локализации модулей ПВР объектов классов сфер и вибраторов

Положение этой линии в поляризационном пространстве  $C^4$  не зависит от геометрических размеров сфер, направления их облучения и длины волны РЛС. Однако

размер и расположение области локализации ПВР на такой линии, естественно, зависят от размеров сфер, объединяемых в данный класс. Изменение поляризационного базиса РЛС приводит к изменению базиса поляризационного пространства и, соответственно, к изменению положения в нем области локализации ПВР.

Для класса тонких, по сравнению с длиной волны, идеальных вибраторов, расположенных в заданной плоскости, которая проходит через линию визирования, ПВР вибраторов в случае линейных поляризаций РЛС может быть представлена в виде:

$$\dot{\mathbf{S}}_{ВЛ} = \dot{\mathbf{S}}_{ОВ}(\theta, \lambda) \left\| \cos^2 \gamma_0 \quad \frac{1}{2} \sin 2\gamma_0 \quad \frac{1}{2} \sin 2\gamma_0 \quad \sin^2 \gamma_0 \right\|^T, \quad (7)$$

где  $\dot{\mathbf{S}}_{ОВ}(\theta, \lambda)$  — коэффициент отражения на собственной линейной поляризации вибратора;  $\Theta$  — угол, между осью вибратора и линией визирования;  $\lambda$  — длина волны РЛС;  $\gamma_0$  — угол, определяющий положение проекции диполя в картинной плоскости относительно поляризационного базиса РЛС.

Собственные значения и собственные векторы ПКМ  $\mathbf{M}_B$  более простой вид имеют на круговых поляризациях РЛС:

$$\begin{aligned} \eta_{B1} &= \overline{\sigma}_B, \quad \eta_{B2} = \eta_{B3} = \eta_{B4} = 0; \\ \dot{\mathbf{b}}_{B1} &= \frac{1}{2} \left\| 1 \quad e^{j2\gamma_0} \quad e^{j2\gamma_0} \quad e^{j4\gamma_0} \right\|^T, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\overline{\sigma}_B$  — средняя ЭПР вибратора на его собственной поляризации.

Из выражений (8) следует, что область локализации ПВР заданного класса вибраторов, как и ПВР класса сфер, одномерна. Положение этой области в сигнальном поляризационном пространстве  $S^4$  определяется четырьмя параметрами:  $\gamma_0$ ;  $\Theta$ ;  $l$  — длиной вибратора и  $\lambda$ . Причем, ориентацию в поляризационном пространстве линии локализации ПВР вибраторов определяет только параметр  $\gamma_0$ , а остальные три параметра определяют размеры области локализации и характер распределения в ней ПВР.

На рис.1  $L(\dot{\mathbf{S}}_B)$  — плоскость локализации модуля ПВР вибратора. Очевидно (см. (7) и рис. 1), что при изменении  $\gamma_0$  линия локализации ПВР вибраторов будет описывать поверхность сложной конусообразной формы, которая никогда не совпадает с линией локализации модулей ПВР класса сфер. Другими словами, радиолокационные отображения в сигнальное поляризационное пространство  $S^4$  сфер и вибраторов никогда не пересекаются.

На основе известных работ могут быть созданы методы приближённого расчёта ПВР тел вращения, которые позволяют провести анализ областей локализации таких тел на аналитическом уровне. Рассмотрим один из частых результатов, полученных для случая локации тел вращения на их собственных (линейных) поляризациях [14].

Собственные значения ПКМ  $\mathbf{M}_{TB}$ , в данном случае, будут равны:

$$\begin{aligned} \eta_{1,2}(\Theta) &= 0,5 \left[ \sigma(\Theta) \pm \sqrt{\Delta \sigma(\Theta) + 4\rho^2(\Theta)} \right], \\ \eta_3(\Theta) &= \eta_4(\Theta) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\sigma(\Theta) = \sigma_1(\Theta) + \sigma_2(\Theta)$ ,  $\Delta\sigma(\Theta) = \sigma_1(\Theta) - \sigma_2(\Theta)$  — соответственно суммы и разности средних значений ЭПР на собственных поляризациях тел вращения заданного класса;

$$\sigma_i(\Theta) = 0.5 \sum_{n=1}^N \left\langle \dot{\mathbf{S}}_{in}(\Theta) * \dot{\mathbf{S}}_n^*(\Theta) \right\rangle, \quad \rho(\Theta) = 0.5 \sum_{n=1}^N \left\langle \dot{\mathbf{S}}_{1n}(\Theta) * \dot{\mathbf{S}}_{2n}^*(\Theta) \right\rangle \quad —$$

соответственно среднее значение ЭПР на  $i$ -ой собственной поляризации и ковариация коэффициентов отражения на собственных поляризациях тел вращения заданного класса;  $N$  — число отражающих элементов (блестящих точек) тела вращения;  $\Theta$  — угол между осью тела вращения и линией его визирования;

.....  $\dot{\mathbf{S}}_{in}$ , ( $i = 1, 2$ ) — коэффициент отражения на  $i$ -й собственной поляризации  $n$ -го отражающего элемента тела вращения.

Нормированные собственные векторы ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_{ТВ}$ , соответствующие собственным значениям (9)  $\eta_1(\Theta)$  и  $\eta_2(\Theta)$ , будут соответственно равны,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{b}}_{1Л} &= \left\| \begin{matrix} a_{11}(a_{11}^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} & 0 & 0 & (a_{11}^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} \end{matrix} \right\|^T \\ \dot{\mathbf{b}}_{2Л} &= \left\| \begin{matrix} a_{12}(a_{12}^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} & 0 & 0 & (a_{12}^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} \end{matrix} \right\|^T, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } a_{11} = -\frac{2\rho}{\sqrt{\Delta\sigma - (\Delta\sigma^2 + 4\rho^2)}}, \quad a_{12} = -\frac{2\rho}{\sqrt{\Delta\sigma + (\Delta\sigma^2 + 4\rho^2)}}.$$

В выражениях (10) обозначение зависимости от  $\theta$  значений  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $\dot{\mathbf{b}}_{1Л}$ ,  $\dot{\mathbf{b}}_{2Л}$  опущено для сокращения записей.

Из приведенных результатов (9), (10) следует, что  $r$ -плоскость локализации тел вращения в случае локации на их собственных линейных поляризациях двумерна и совпадает с координатной плоскостью  $\dot{\mathbf{S}}_{11}O\dot{\mathbf{S}}_{22}$  исходного поляризационного пространства. Направления главных осей эллипса рассеивания (области локализации) ПВР определяются значениями ковариации  $\rho(\theta)$  коэффициентов отражения и разностью  $\Delta\sigma(\theta)$  средних значений ЭПР на собственных поляризациях тел вращения. Изменение угла  $\theta$  не влияет на положение их плоскости локализации, а приводит к повороту главных осей эллипса рассеивания ПВР в координатной плоскости  $\dot{\mathbf{S}}_{11}O\dot{\mathbf{S}}_{22}$ . При этом поворот осуществляется таким образом, что для направлений  $\theta$ , на которых коэффициенты отражения  $\dot{\mathbf{S}}_{1n}(\theta) \equiv \dot{\mathbf{S}}_{2n}(\theta)$ , т.е.  $\Delta\sigma = 0$ , эллипс рассеивания ПВР вырождается в линию, которая совпадает с линией локализации ПВР сфер (см. рис.1).

В общем, случае положение в поляризационном пространстве двумерной плоскости локализации ПВР тел вращения может изменяться в зависимости от изменения взаимной ориентации в картинной плоскости собственного поляризационного базиса объекта и поляризационного базиса РЛС. Причём эта зависимость на линейных поляризациях РЛС более сильная, чем на круговых поляризациях.

Обобщая результаты анализа собственных значений и собственных векторов ПКМ ПВР тел вращения можно полагать, что размерности областей локализации ПВР объектов сложной формы с одной или несколькими плоскостями симметрии будут переменными, и равным 1, 2 или 3. Размерность соответствующей  $r$ -плоскости будет иметь значение 1 или 2 в случаях, если линия визирования окажется в плоскости симметрии объекта, и будет равна трем при других ориентациях объектов относительно РЛС. Более подробный анализ областей локализации ПВР объектов сложной формы,

необходимых при решении практических задач, целесообразно проводить на основе натуральных данных из-за ограниченного количества приемлемых по точности аналитических моделей ПВР соответствующих объектов сложной формы.

Для исследований качества решения традиционных задач радиолокации важным является класс объектов, представляющий собой совокупность случайных рассеивателей, в частности, диполей, хаотически расположенных в некотором объеме (облака дипольных отражателей). Если имеется возможность не учитывать взаимное влияние диполей в процессе отражения, то ПВР совокупности диполей, находящихся в разрешаемом объеме, определяется как сумма ПВР одиночных диполей с учетом их ориентации относительно поляризационного базис РЛС и расположения вдоль линии визирования относительно условного центра объекта. Такая модель ПВР облака позволяет получать в ряде случаев наглядные аналитические результаты. Одним из таких является следующий.

Пусть проекции на картинную плоскость диполей, находящихся в разрешаемом объеме, распределены равномерно в секторе  $\pm G$  ( $G < \pi/2$ ) относительно среднего направления, определяемого значением  $\gamma_0$ . Решая характеристическое уравнение ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_g$ , получим в данном случае три её собственных значения отличные от нуля, т.е.  $\text{rg } \dot{\mathbf{M}}_g = 3$  [14]. Следовательно, ПВР облака диполей, в общем, случае, локализуется в трехмерном комплексном пространстве. Опуская аналитические выражения для собственных значений ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_g$ , запишем общее выражение для нормированных собственных векторов этой матрицы в случае круговых поляризаций РЛС:

$$\dot{\mathbf{b}}_{g_i} = a_i \begin{bmatrix} -(a_{1i} + a_{2i}) & 1 & 1 & a_{2i}^* \end{bmatrix}^T, \quad (11)$$

где  $a_i = (|a_{1i} + a_{2i}|^2 + 2 + |a_{2i}|^2)^{-1/2}$ ,  $i=1,2,3$ ;

$$\begin{aligned} a_{1i} &= \frac{2\sigma_\Sigma - \eta_i}{\sigma_\Sigma \cdot \sin 2G/2g} e^{-j2\gamma_0}; \\ a_{2i} &= \frac{(2\sigma_\Sigma - \eta_i) \cos 2G - 2G_\Sigma \sin 2G/2G}{\sigma_\Sigma - \eta_i - \sigma_\Sigma \sin 4G/4g} e^{-j2\gamma_0} \end{aligned} \quad (12)$$

Из выражений (11 и 12) следует, что нормированные собственные векторы ПКМ части облака диполей, находящихся в разрешаемом объеме РЛС, зависят от  $\eta_i$  — собственных значений ПКМ  $\dot{\mathbf{M}}_g$ ;  $\sigma_\Sigma$  — суммарной средней ЭПР на собственной поляризации диполей;  $G$  — величины сектора картинной плоскости, в котором распределены проекции диполей на эту плоскость;  $\gamma_0$  — среднего направления этого сектора в картинной плоскости. Поскольку собственные векторы  $\dot{\mathbf{b}}_{g_i}$  определяют в поляризационном пространстве  $S^4$  ориентацию главных осей эллипсоида рассеивания (области локализации) ПВР диполей, а параметры  $\sigma_\Sigma$ ,  $\gamma_0$ ,  $G$ ,  $\eta_i$  могут изменяться в пространстве и во времени, то следует ожидать, что области локализации ПВР диполей различных разрешаемых объемов могут отличаться, и с течением времени могут изменять свою ориентацию и размеры.

Параметры областей локализации поляризационных векторов активных помех различных поляризаций, принимаемых в процессе ППЗП, могут быть также оценены на основе аналитических моделей соответствующих ПВ АП. Это позволяет на аналитическом уровне исследовать различия ПВР целей и ПВ АП различных поляризаций, а на основе статистического моделирования с приемлемой точностью



исследовать эффективность различных алгоритмов обнаружения, оценки координат и распознавания целей на фоне активных помех, воздействующих на БРЛС, прежде всего, по главному лепестку диаграммы направленности её антенны. В частности, в случае круговых поляризаций РЛС собственные значения ПКМ линейно поляризованной активной шумовой помехи будут равны:

$$\eta_1 = \eta_2 = 0,5P; \eta_3 = \eta_4 = 0;$$

где  $P$  — мощность линейно поляризованной активной шумовой помехи в поляризационном базисе антенны постановщика помех.

Соответствующие собственным значениям нормированные собственные векторы будут равны:

$$\mathbf{b}_1 = \frac{1}{\sqrt{1+e^{-j4\gamma}}} \left\| e^{-j2\gamma} \quad 1 \quad 0 \quad 0 \right\|^T;$$

$$\mathbf{b}_2 = \frac{1}{\sqrt{1+e^{-j4\gamma}}} \left\| 0 \quad 0 \quad e^{-j2\gamma} \quad 1 \right\|^T;$$

В рамках данной статьи полезно обратить внимание на основные результаты анализа этих параметров, которые состоят в следующем. При заданном варианте реализации метода ППЗП каждый вид поляризации активной помехи в поляризационном пространстве  $S^4$  имеет свою  $r$ -плоскость (область) локализации, отличающуюся от других. Положение такой области локализации определяется видом поляризации помехи и взаимной ориентацией в картинной плоскости поляризационных базисов антенн РЛС и постановщика АП. Области локализации ПВР объектов разной формы и ПВ АП различных поляризаций отличаются размерностью и расположением в поляризационном пространстве. Известно [1, 3], что размерность области пересечения двух  $r$ -плоскостей будет всегда меньше меньшей из размерностей пересекающихся плоскостей. Следовательно, вероятностная мера пересечения таких плоскостей будет равна нулю. Другими словами, попарно сравниваемые распределения ПВР объектов разных классов и ПВ АП регулярных поляризаций в поляризационном пространстве имеют максимально возможные различия. Аналогичный вывод справедлив и для попарно сравниваемых распределений ПВ АП регулярных поляризаций.

Остановимся кратко на обсуждении статистических свойств ПВР подстилающей поверхности. Экспериментальные данные по измерению ПВР подстилающих поверхностей (ПП) в литературе найти не удалось. Однако имеется достаточно большое количество результатов измерений амплитуд сигналов, отраженных от участков ПП, на ортогональных (вертикальной и горизонтальной, а также кроссовых к ним) поляризациях. Для полного описания ПВР в известных экспериментальных данных отсутствуют сведения о разности фаз компонентов ПВР ПП. В этих условиях оценки параметров распределения ПВР ПП могут быть получены путем математического моделирования соответствующих ПВР с учетом экспериментальных данных об энергетических характеристиках отраженных сигналов.

Результаты проведенного моделирования, по уровню мощности отраженного сигнала соответствуют поверхности, покрытой высокой травой. Различие типов ПП и условий измерения вероятнее всего будут заметно влиять на фазовые соотношения между элементами  $\dot{S}_{11}$  и  $\dot{S}_{21}$ ,  $\dot{S}_{22}$  и  $\dot{S}_{12}$  ПВР ПП. Проведенный анализ показал, что изменение соотношения фаз между элементами  $\dot{S}_{11}$  и  $\dot{S}_{21}$ ,  $\dot{S}_{22}$  и  $\dot{S}_{12}$  ПВР ПП приводит к изменению ориентации собственных векторов ПКМ ПП в комплексном

поляризационном пространстве и, как следствие, к изменению ориентации области локализации ПВР ПП. Результаты моделирования, хотя и являются предварительными, тем не менее, позволяют сделать некоторые выводы. ПВР ПП различных типов локализуются в четырехмерном комплексном поляризационном пространстве в виде двухмерного эллипса. Форма области локализации слабо зависит от типа однородной по структуре ПП. Исключение составляют поверхности с доминирующим отражающим элементом (например, холм, горы, строения и т.п.). Изменение типа ПП приводит к изменению ориентации плоскости (области) локализации ПВР. Последнее обстоятельство, учитывая вероятностную меру, соответствующую линии пересечения таких плоскостей, является предпосылкой высокой различимости отображений таких ПП в комплексном поляризационном пространстве.

### Результаты экспериментальной оценки параметров распределений многомерных ортогонально поляризованных сигналов

При анализе результатов обработки экспериментальных данных следует учитывать, что любые измерения сопровождаются ошибками. Поэтому ПКМ ПВР, полученные по результатам измерений, будут плохо обусловленными. При этом возникает задача определения истинного ранга ПКМ. Известные рекомендации [11] по её решению сводятся к определению порога, с которым сравниваются собственные значения ПКМ —  $\eta_i$ . В частности, порог может быть определён в соответствии с выражением

$$Z_n = Z_0 + \frac{\eta_4}{\text{Sp} \hat{\mathbf{M}} - 4\eta_{ш}}, \quad (13)$$

где  $\text{Sp} \hat{\mathbf{M}}$  — след оценки ПКМ по результатам измерения ПВР в процессе конкретного эксперимента;  $4\eta_{ш}$  — след ПКМ собственных шумов приёмных каналов измерителя ПВР;  $\eta_4$  — четвёртое, наименьшее собственное значение ПКМ  $\hat{\mathbf{M}}$ , обязанное ошибкам измерений;  $Z_0$  — порог, определяемый мерой заданной информативности [11], в дальнейшем полагается  $Z_0 = 2\%$  от следа соответствующей ПКМ.

Обсудим результаты обработки данных, полученных на измерительном комплексе ВИРТА ПВО им. Говорова Л.А. в течение 80-х годов [9, 10]. Основные технические характеристики измерительного комплекса:

- |  |                          |
|--|--------------------------|
| – режим работы   | непрерывный;             |
| – поляризации РЛС  | линейные;                |
| – диапазон рабочих частот  | 8–10,5 ГГц;              |
| – развязка по поляризации между ортогональными по поляризации каналами   | не хуже 30 дБ;           |
| – среднеквадратические ошибки измерений модулей элементов ПВР и разностей фаз при отношении сигнал/шум не ниже 10 дБ | не превышает 2 дБ и 15°; |
| – ошибки установки модели цели на вертикальной опоре составляют  | менее 2°;                |
| – дискретность измерений ПВР модулей по $\beta$ -углу поворота опоры   | 0.25°;                   |
| – угол места установки модели  | 14°.                     |

Ниже обсуждаются результаты обработки измерений ПВР:

- конуса с закруглённой носовой частью (К),
- сетчатого биконуса (ВТ),
- сплюснутого по одной из осей эллипсоида вращения (Е);
- конуса с закруглённой носовой частью, покрытого радио поглощающим материалом (К + РПП),
- конуса с закруглённой носовой частью и со средствами искажения ЭПР, увеличивающими его среднюю ЭПР не менее чем в 2 раза (К + СИ).

Габаритные размеры объектов были примерно одинаковы. Измерения ПВР проведены на частоте 9160 МГц.

Результаты обработки ПВР состоят в следующем. Ранг ПКМ (К) и (Е) в зависимости от угла поворота опоры  $\beta$  принимает значения 1 или 2. В частности, для конуса (К) ранг ПКМ равен единице, в случае если

$$\beta \in \pm[0^\circ, 4^\circ]; \pm[66^\circ, 99^\circ]; \pm[165^\circ, 180^\circ],$$

а при всех остальных значениях  $\beta$  — двум.

Определённое представление о взаимном расположении областей локализации ( $r$ -мерных "эллипсоидов" разброса) соответствующих ПВР объектов разной формы позволяет получить их упрощённое (такова плата за наглядность) изображение в реальном трёхмерном пространстве, приведенное на рис. 2; 3; 4. Данные для построения этих областей локализации представлены в таблице 1, где обозначены:  $q^2c/u$  — среднее отношение сигнал/шум, при котором производилось измерение соответствующих ПВР; ОДО — часть реального облака дипольных отражателей, находящегося в разрешаемом объёме РЛС. Поскольку ПВР ОДО получены на круговых поляризациях, то на рис. 4 область локализации ПВР (К) пересчитана на круговые поляризации.

Оценки собственных значений  $\eta_1 - \eta_4$  ПКМ объектов и порог  $Z_n$  (13) в таблице 1 приведены в процентах по отношению к следу соответствующей ПКМ.

Таблица 2

Объект	$q^2c/u$ , дБ	$\eta_1$ , %	$\eta_2$ , %	$\eta_3$ , %	$\eta_4$ , %	$Z_n$ , %	$\text{rg } \hat{M}$
К	22,3	63,7	35,6	0,55	0,03	2,3	2
ВТ	23,6	65,9	20,2	13,85	0,05	2,21	3
Е	13	49,8	45,5	4,5	0,2	6,9	2
ОДО	15,5	65,5	23,5	10,8	0,2	2,8	3

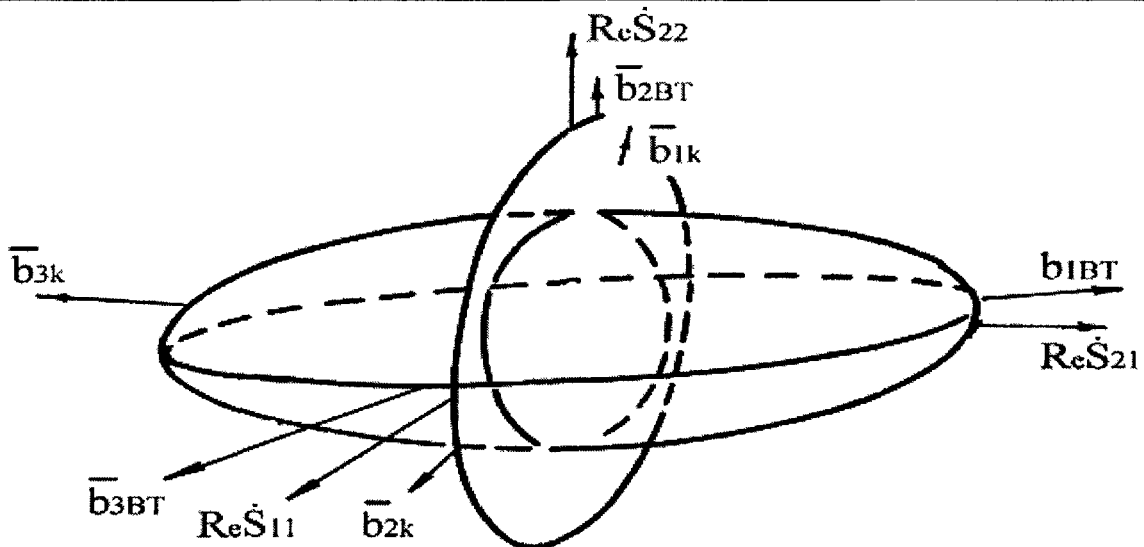


Рис 2. Области локализации ПВР объектов К и ВТ

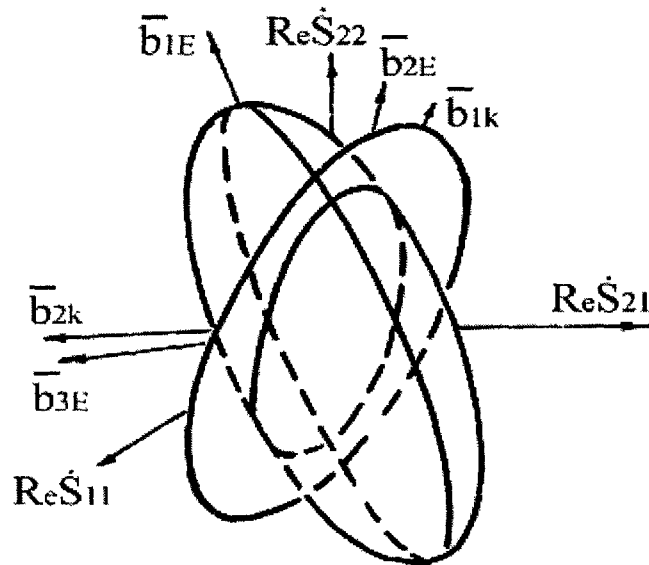


Рис 3. Области локализации ПВР объектов К и Е

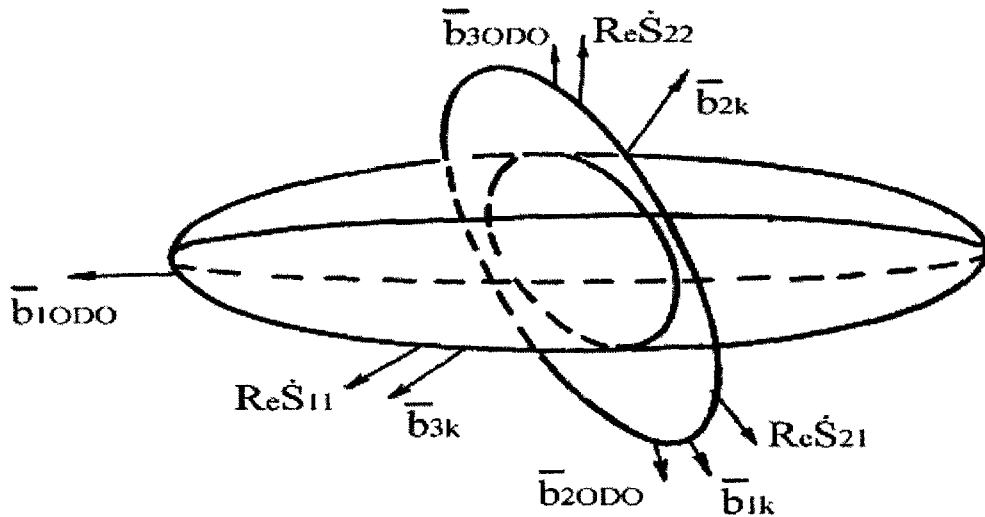


Рис 4. Области локализации ПВР объектов К и ОДО (при круговых поляризациях РЛС)

Приведенные результаты эксперимента свидетельствуют о том, что области локализации ПВР объектов разной формы отличаются не только размерностью, но и расположением в поляризационном пространстве. В частности, области локализации ПВР (К) двухмерны, а ПВР ВТ и ОДО — трёхмерны. Несмотря на то, что размерности областей локализации ПВР (К) и (Е) одинаковы, ориентации их плоскостей, в которых сосредоточено более 90% энергии ПВР, различны, что предопределяет существенные различия распределений ПВР объектов таких классов в поляризационном пространстве.

Определённый интерес представляет исследование влияния радиопоглощающих покрытий (РПП) и средств искажений (СИ) ЭПР на характеристики области локализации ПВР (К). Обработка измерений ПВР объектов в этих случаях даёт следующие результаты.

Применение РПП приводит к уменьшению ЭПР (К), а использование в данном случае СИ ЭПР (К) привели к увеличению средней ЭПР (К). Относительные величины собственных значений ПКМ могут быть представлены в виде следующих векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{K+P\Pi\Pi} &= \|\|55,3 \quad 42,0 \quad 2,4 \quad 0,3\|^T, \%; \\ \mathbf{P}_{K+СИ} &= \|\|45,0 \quad 30,8 \quad 23,8 \quad 0,4\|^T, \%. \end{aligned} \quad (14)$$

Сопоставление данных (14) с соответствующими величинами таблицы 2 для объекта (К) из металла позволяет сделать следующие выводы. Применение РПП приводит к некоторой деформации области локализации ПВР (К) (в данном примере размерности областей одинаковы). Применение СИ ЭПР может привести к деформации области локализации ПВР (К) и изменению её размерности.

Сравним матрицы собственных векторов ПКМ (К), (К+ РПП) и (К + СИ). Для собственных векторов ПКМ соответствующих объектов имеем:

$$\dot{\mathbf{V}}_K = \|\| \begin{array}{ccc} -0,33 + j0,04 & 0,94 & 0,02 + j0,04 \\ 0,01 & -0,01 & 0,28 \\ 0,01 & -0,02 & 0,96 \\ 0,94 & 0,33 + j0,04 & -j0,02 \end{array} \|\| \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{K+P\Pi\Pi} = \|\| \begin{array}{ccc} 0,81 & 0,41 - j0,42 & 0,03 + j0,11 \\ -0,02 & 0,01 & 0,1 \\ -0,04 & 0,04 & 0,99 \\ -0,41 - j0,42 & 0,81 & -j0,01 \end{array} \|\| \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{K+СИ} = \|\| \begin{array}{ccc} 0,86 + j0,01 & -0,45 + j0,19 & 0,16 + j0,02 \\ 0 & 0 & -0,01 + j0,01 \\ -0,08 - j0,06 & 0,12 - j0,21 & 0,97 \\ 0,46 + j0,22 & 0,81 & -0,05 - j0,19 \end{array} \|\| \quad (17)$$

При анализе матриц собственных векторов (15) ... (17) полезно обратить внимание на следующие обстоятельства. Первые два вектора (столбца матриц)  $\dot{\mathbf{V}}$  определяют плоскость, в которой локализуется около 90% энергии отраженного сигнала (см. сумму первых двух собственных значений (14) и соответствующих данных табл.1.). Третий собственный вектор в рассматриваемом случае представляет собой нормаль к плоскости, в которой сосредоточено около 90% энергии отраженного сигнала (ПВР).

Из сопоставления (14) и (15) следует, что применение РПП приводит к развороту эллипса разброса ПВР (К) в плоскости локализации, положение которой в поляризационном пространстве практически остаётся неизменной. Небольшой угол между нормальными к соответствующим областям локализации не превышает ошибок оценки самого угла. В случае использования СИ ЭПР третий вектор (17) также претерпевает наименьшие искажения. Это позволяет полагать, что плоскость локализации является одним из наиболее устойчивых параметров распределений ПВР объектов каждого класса в рассматриваемом поляризационном пространстве.

Таким образом, физический эксперимент подтвердил основные теоретически полученные результаты для объектов простых форм. Кроме того, позволил получить определённую информацию о статистических свойствах ПВР объектов, отличающихся

по форме от тел вращения, а также объектов, покрытых РПП и со средствами искажения их ЭПР.

Определённое представление об областях ПВР объектов с плоскостью симметрии позволяют получить результаты экспериментов, полученные методом физического моделирования. Ниже приводятся собственные значения, выраженные в процентах по отношению к следу, ПКМ металлических моделей, подобных по форме крылатым ракетам "СРЭМ" и "Мартель", а также соответствующих им матриц собственных векторов:

$$\mathbf{P}_C = \|75,75 \quad 20,7 \quad 1,9 \quad 1,65\|^T, \%$$

$$\mathbf{P}_M = \|66,7 \quad 29,45 \quad 2,0 \quad 1,85\|^T, \%$$

$$\dot{\mathbf{V}}_C = \begin{pmatrix} 0,83 & 0,06 - j0,56 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0,7 \\ -0,06 - j0,56 & 0,83 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{V}}_M = \begin{pmatrix} 0,4 + j0,4 & 0,82 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0,7 \\ 0,82 & -0,4 + j0,4 & 0 \end{pmatrix}.$$

Прежде чем сравнивать значения  $\mathbf{P}_C$ ,  $\mathbf{P}_M$ ,  $\dot{\mathbf{V}}_C$  и  $\dot{\mathbf{V}}_M$ , заметим, что габаритные размеры объектов примерно одинаковы, а полная ЭПР (по экспериментальным оценкам на длине волны 15 см) составляет соответственно  $\sigma_C = 0,97\text{м}^2$ ,  $\sigma_M = 0,96\text{м}^2$ . Сопоставление значений  $\mathbf{P}_C$ ,  $\mathbf{P}_M$ ,  $\dot{\mathbf{V}}_C$  и  $\dot{\mathbf{V}}_M$  позволяет сделать следующие выводы. Области локализации объектов двумерны. Эллипсы разброса ПВР близки по форме, лежат в одной плоскости (третьи собственные вектора равны), однако их главные оси практически ортогональны. Это создаёт определенные предпосылки для радиолокационного распознавания объектов таких форм.

Обсудим ряд результатов обработки натуральных данных. [6, 10]. РЛС обладала возможностью излучения сигналов на взаимно ортогональных круговых поляризациях и полного поляризационного приёма на четырёх частотах диапазона Б. Разрешающая способность РЛС на каждой из частот составляла 900 м. Поляризация сигналов на излучение изменялась от обзора к обзору (примерно через 10 сек.). Полностью 4 элемента ПВР на каждой из частот могли быть измерены только за два периода обзора. При таком режиме измерений ПВР когерентность различных половин ПВР нарушалась. Поэтому в РЛС было реализовано аналоговое устройство оценки на круговых поляризациях шести поляризационно-статистических параметров (ПСП) [6], представляющих собой обобщённые параметры Стокса. При получении оценок ПСП использовалось усреднение по времени и по частотам. На рис. 5. в качестве иллюстрации результатов оценки ПСП в натуральных условиях изображены годографы двухмерных векторов  $(\mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3)^T$  как функций курса ( $\beta$ ) истребителей ЯК-28п и МИГ-25 относительно РЛС, обозначенные цифрами 1 и 2 соответственно. На рис. 5 значения ПСП  $\mathbf{P}_2$  и  $\mathbf{P}_3$  даны в относительных единицах.

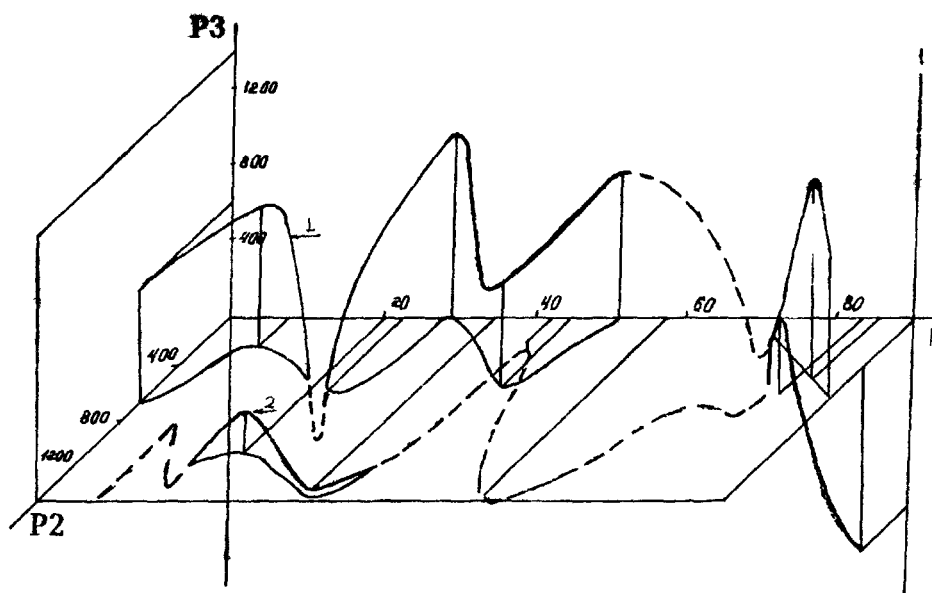


Рис 5. Годографы двухмерных признаков как функции курса целей

Из графиков видно, что годографы 1 и 2 лежат в различных квадрантах пространства признаков. Отсюда следует, что в поляризационном пространстве области локализации ПВР рассматриваемых объектов не пересекаются, а соответствующие объекты будут распознаваться практически безошибочно.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают высокую информативность ПВР и целесообразность их использования для расширения возможностей радиолокаторов.

### **Оценки возможностей обнаружения и распознавания целей на фоне помех при использовании многомерных ортогонально поляризованных сигналов**

Предшествующий анализ параметров областей локализации ПВР заданных классов показывает, что оптимальное решающее правило обнаружения цели, с физической точки зрения, должно определять "фильтр" в поляризационном пространстве, "настроенный" на область локализации ПВР обнаруживаемой цели. Кроме того, это правило должно обеспечивать компенсацию коррелированных составляющих помехи по каждой из координат. Поскольку области локализации ПВР объектов разных классов существенно отличаются, то решающее правило обнаружения для получения наилучших показателей эффективности приходится строить на основе априорной информации, включающей, например, первые два момента. По этой же причине решающее правило приходится строить многоканальным не только по классам (фактически - по типам) целей, но и для каждого класса - в зависимости от ориентации объекта относительно РЛС. Полученное таким образом решающее правило обнаружения по существу является решающим правилом обнаружения - распознавания целей, т.к. на выходе каждого канала обнаружения сигнал "есть цель" может появиться только в том случае, если на вход этого канала поступает ПВР цели, класс (тип) которой соответствует данному каналу. Такая достаточно очевидная физическая интерпретация позволяет в данном случае не останавливаться на синтезе решающих правил (чтобы не повторять известные теоретические результаты), а сразу перейти к анализу их эффективности.

Наиболее достоверные оценки показателей эффективности на настоящем этапе исследований представляется возможным получить методом статистического моделирования с использованием экспериментально измеренных ПВР объектов разных классов и помех.

Обсудим оценки эффективности обнаружения цели в облаке диполей, полагая, что средняя радиальная скорость диполей равна радиальной скорости цели (т.е. в случае, когда доплеровские различия практически отсутствуют). Оценка показателей эффективности проводилась при следующих исходных данных. В качестве объекта обнаружения был использован конус (К) с закруглённой носовой частью. Среднее количество диполей в разрешаемом объёме составляло 344 шт. и 135 шт. и в процессе моделирования поддерживалось постоянным независимо от задаваемого отношения сигнал/помеха. Ориентация диполей задавалась хаотической. Решающее правило обнаружения создавалось на основе критерия Вальда. При этом в качестве основных показателей эффективности обнаружения рассматривались:  $D$  — вероятность правильного обнаружения,  $F$  — вероятность ложной тревоги,  $\bar{n}(q_1^2, q^2)$  — средний объём выборки необходимый для принятия решения с заданными значениями  $D$  и  $F$ , где  $q_1^2, q^2$  — ожидаемое и фактическое (в ходе испытаний) отношение сигнал/помеха.

Вид характеристик  $\bar{n}(q_1^2, q^2)$  и  $D(q_1^2, q^2)$  при  $F = 10^{-3}$  представлен на рис. 6, где пунктирные кривые соответствуют первому варианту облака диполей (344 шт.), а сплошные — второму (135 шт.).

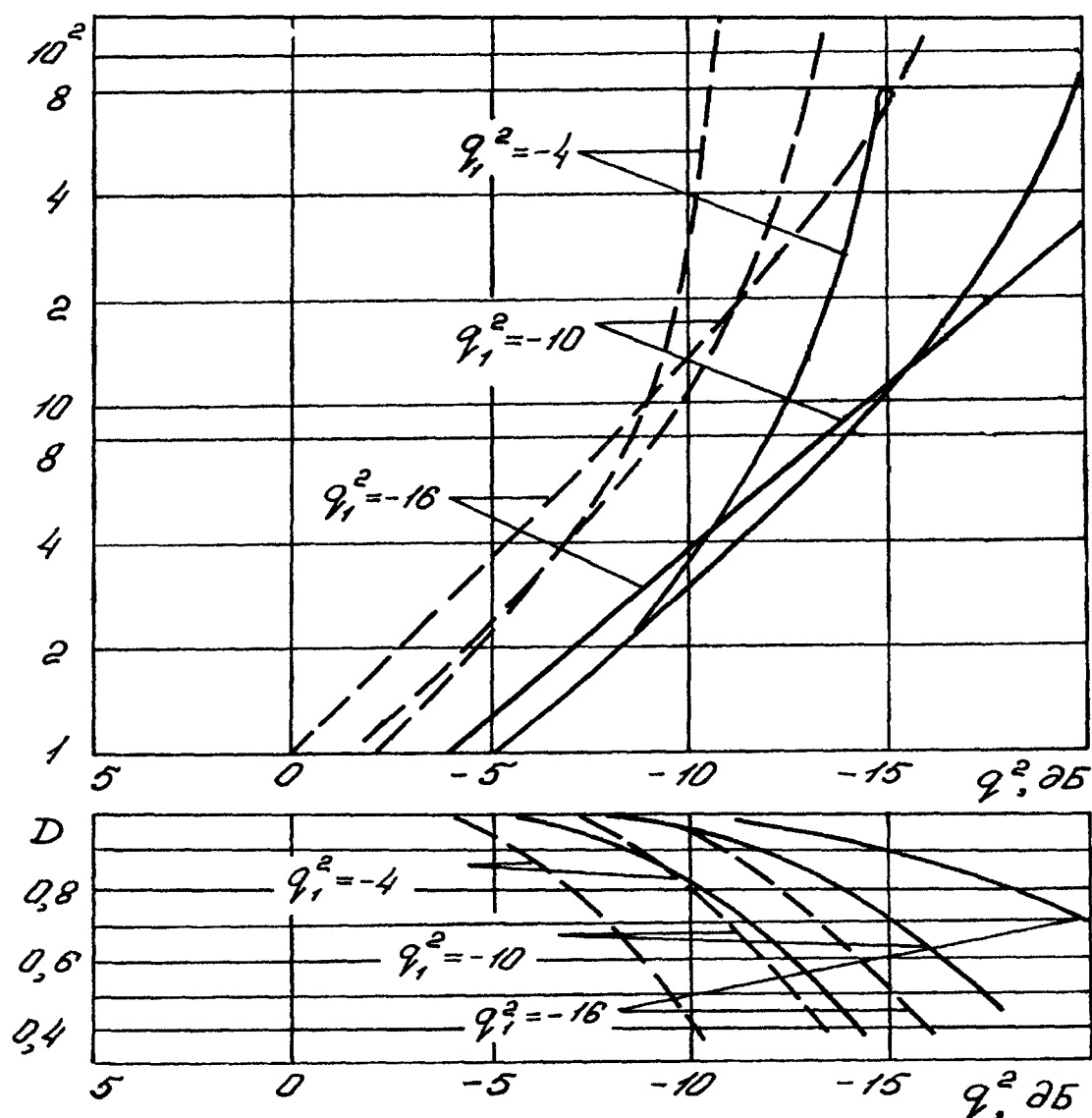


Рис 6. Графики значений  $\bar{n}(q_1^2, q^2)$  и  $D(q_1^2, q^2)$



В целом характер отображаемых графиками зависимостей не противоречит известным аналогичным результатам. Общей закономерностью является увеличение среднего объёма выборки при увеличении мощности критерия. Из приведенных результатов следует, что зависимость среднего объёма выборки от соотношения расчётного значения  $q_1^2$  и фактического  $q^2$  является существенной. При этом обнаружитель, настроенный на более низкое отношение сигнал/помеха обладает более высокими показателями качества обнаружения во всём диапазоне отношений сигнал/помеха, рассматриваемых в данном эксперименте.

Результаты моделирования показывают, что поляризационно-статистические характеристики помехи оказывают существенное влияние как на значение среднего объёма выборки, так и на вероятностные показатели качества. В частности, при использовании в процессе статистического моделирования ПВР облака диполей (344 шт. и 135 шт.) в разрешаемом объёме и одинаковых отношений сигнал/помеха средний объём выборки  $\bar{n}(q_1^2, q^2)$  изменялся до десятичного порядка, а выигрыш в отношении сигнал/помеха при фиксированных  $D, F, \bar{n}$  изменялся до 5 дБ. Несколько улучшить показатели качества при малых отношениях сигнал/помеха представляется возможным при использовании рангового обнаружителя.

Возможность обнаружения и распознавания отдельно неразрешаемых целей на фоне пассивных помех иллюстрируют результаты статистического моделирования, приведенные в табл. 3. При моделировании в качестве полезных сигналов были использованы измеренные на экспериментальном измерительном комплексе ПВР перечисленных выше моделей целей (К, ВТ, Е) и Сф — сфера.

В качестве пассивной помехи была использована математическая модель ПВР совокупности хаотически расположенных в разрешаемом объёме диполей. Цели и помехи находились в одном разрешаемом объёме. При этом полагалось, что доплеровские различия полезных и мешающих сигналов в среднем отсутствуют. Алгоритм обнаружения-распознавания был реализован многоканальным (четырёхканальным) по классам целей на основе последовательной процедуры Вальда.

Таблица 3

$q^2$ , дБ	Показатели эффективности	К	ВТ	Е	Сф
0	$\hat{D}$	0,96	0,67	0,94	0,97
	$\hat{F}$	0,01	0,12	0,05	0,01
	$\bar{N}_1$	13	31	17	28
	$\bar{N}_2$	4	8	5	7
-5	$\hat{D}$	0,88	0,5	0,86	0,9
	$\hat{F}$	0,04	0,13	0,08	0,03
	$\bar{N}_1$	30	66	33	60
	$\bar{N}_2$	5	17	9	13

В таблице 3 использованы следующие обозначения:  $\bar{N}_1, \bar{N}_2$  — средний объём выборки, потребный для принятия решения в случаях, когда цель данного класса есть в данном объёме разрешения, и когда её нет;  $\hat{D}, \hat{F}$  — оценки вероятностей правильного обнаружения-распознавания цели и вероятности ложной тревоги в соответствующем канале по серии из 300 испытаний;  $q^2$  — отношение средней мощности ПВР цели к средней мощности ПВР диполей.

Сравнение возможностей обнаружения целей на фоне пассивных помех в случаях полного поляризационного приёма (ППП) и ППЗП позволяют привести результаты статистического моделирования, приведенные в таблице 4.

Таблица 4

Метод локации	$q^2$ , дБ	$\hat{D}$	$\hat{F}$	$\bar{N}_1$	$\bar{N}_2$
ППЗП	0	0,99	0,04	9	6
ППП		0,77	0,15	74	58
ППЗП	-5	0,9	0,06	24	13
ППП		0,65	0,21	259	162

Из приведенных в таблице 4 результатов следует, что по сравнению с ППЗП при ППП средний объем выборки возрастает примерно в 10 раз; вероятность пропуска цели — в 4–6 раз и вероятность ложной тревоги — в 3–4 раза.

Возможности обнаружения-распознавания целей на фоне активных шумовых помех в главном лепестке диаграммы направленности антенны демонстрируют результаты полунатурного эксперимента [14], проведенного в 1992–1995г. под руководством доцента Мартынчука А.А. Сущность полунатурного эксперимента состояла в том, что при оценках показателей качества работы алгоритмов обнаружения - распознавания методом статистического моделирования в качестве ПВ АП были использованы натурные данные, а в качестве ПВР целей были использованы данные, полученные методами математического и физического моделирования.

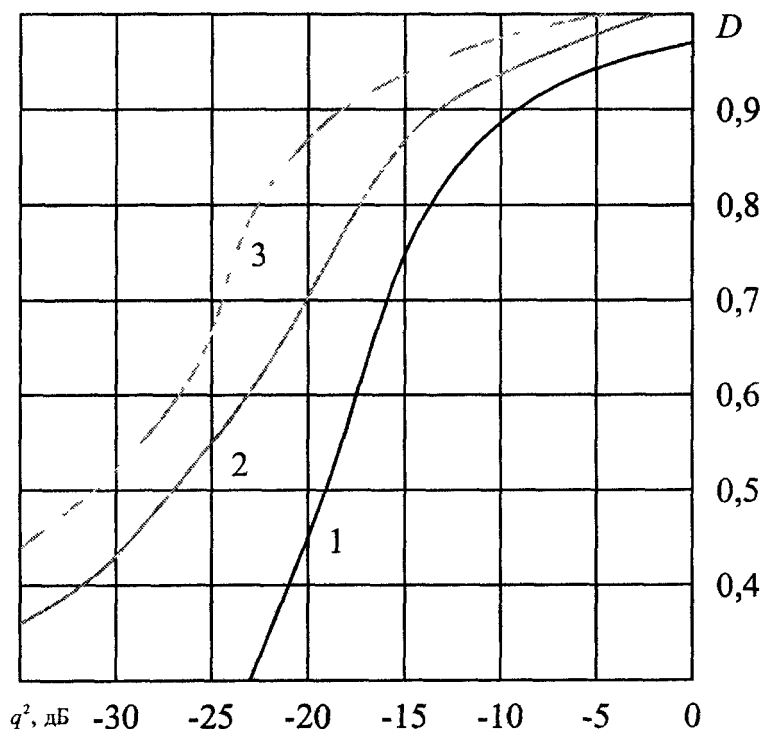


Рис 7 Экспериментальные оценки вероятности правильного обнаружения-распознавания целей

На графике рис.7 приведены результаты полунатурных испытаний при заданной вероятности ложной тревоги  $F = 0,0001$ . Данные графиков получены при:

- последовательном во времени методе измерения ПВР цели (кривая 1);
- двухчастотном методе измерения ПВР цели (кривая 2);
- моноимпульсным методом измерения ПВР цели (кривая 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор результатов исследований предпосылок и показателей эффективности метода полного поляризационного зондирования пространства позволяет сделать следующие выводы.

Одно из направлений расширения возможностей РЛС может быть связано с использованием полного поляризационного зондирования пространства, которое позволяет получить наиболее полную информацию, о характеристиках активных помех и об электрофизических характеристиках объектов, обеспечивающую решение задач, которые в рамках традиционных методов представляются практически неразрешимыми.

Метод обеспечивает расширение возможностей радиолокатора по разрешению, обнаружению, оценке координат и распознаванию объектов заданных классов (с точностью до типа цели) при приемлемых показателях качества на фоне:

– других традиционно неразрешаемых рассеивателей при отсутствии доплеровских различий сигналов и отношениях сигнал/помеха (с/п) до минус 10–15 дБ и меньше, в то время, как в современных РЛС для получения тех же показателей качества требуется отношение с/п равное примерно +14 дБ;

– активных помех, воздействующих по главному лепестку диаграммы направленности антенны радиолокатора, при отношениях с/п до минус 20–25 дБ и меньше.

В целом энергетический выигрыш по сравнению с известными методами традиционной радиолокации при обнаружении может составлять до 20 дБ и более, а при распознавании — до 30–35 дБ.

### Библиографический список

1. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Наука, 1963.
2. Ярушек В.Е. Некоторые вопросы различимости сигналов на фоне помех. – Харьков: АРТА, 1963.
3. Розенфельд В.А. Многомерные пространства. – М.: Наука, 1966.
4. Канарейкин Д. Б., Потехин В.А., Павлов Н. В., Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966.
5. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. – М.: Сов. радио, 1974.
6. Храбростин Б.В., Бурканов В.М. Устройство определения геометрических характеристик объекта. А.с. № 97365, 1976.
7. Толкачев А.А., Храбростин Б.В. и др. Устройство для измерения элементов поляризационной матрицы рассеяния. А.с. № 208117, 1984.
8. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. //Под ред. проф. Тучкова Л.Т. – М.: Радио и связь, 1985.
9. Храбростин Б.В., Сапов М.М. и др. Устройство для обнаружения целей в облаке диполей. А.с. № 269071, 1988.
10. Храбростин Б.В., Зулий Г.В. и др. Устройство для распознавания радиолокационных целей. А.с. № 273220, 1988.
11. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. Справочное издание // Под ред. С.А. Айвазена. –М: Финансы и статистика, 1989.
12. Храбростин Б.В., Мартынчук А.А и др. Устройство для обнаружения целей в облаках диполей. А.с. № 326176, 1991.
13. Храбростин Б.В., Поздышев В.Ю. и др. Устройство для обнаружения целей в облаках диполей. А.с. № 329666, 1991.
14. Храбростин Б.В., Мартынчук А.А., Зубрицкий Г.Н. Применение метода полного поляризационного зондирования в РЛС. Сб. н. тр. 6 Международной НТК, вып. 6, ч. 1. - Харьков: Изд. ХГПУ, 1998, с.351-354.
15. Храбростин Б.В., Храбростин Д.Б. Устройство для измерения поляризационной матрицы рассеяния объекта. Патент РФ № 2183022, 2002 г.
16. Храбростин Б.В. Способ и устройство измерения поляризационной матрицы рассеяния объекта. Патент РФ № 2187129, 2002 г.

УДК 621.396.96

## АДАПТИВНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИ СОСТАВНОЙ ГАУССОВСКОЙ ПОМЕХЕ С БЛОЧНОЙ-ЦИРКУЛЯНТНОЙ МАТРИЦЕЙ КОВАРИАЦИЙ.

*В.С. Голиков, О.М. Лебедева*

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования [1-3] отраженных сигналов в современных радарах с высоким уровнем разрешения показывают, что помехи представляют собой негауссовский случайный процесс, который можно аппроксимировать, например, составным гауссовским процессом. Экспериментальные результаты показывают, что плотность вероятности распределения амплитуд такого процесса может быть представлена К-распределением. Это теоретически согласуется с моделью помехи как составного гауссовского процесса.

Первый детектор для такого типа помехи был предложен [4] и обеспечивал постоянную вероятность ложной тревоги, но требовал знания матрицы ковариации помехи, что на практике редко достижимо. В [4,5] было предложено использовать оценку ковариационной матрицы помехи по вторичным данным выборки помехи. Этот адаптивный детектор использовал нормализованные вторичные данные и обеспечивал робастность вероятности ложной тревоги по отношению к матрице ковариаций помех.

В настоящей статье мы рассматриваем новый алгоритм детектирования, основанный на теплицевой структуре матрицы ковариации помех. На основе теории блочно-циркулянтных матриц вместо оценки выборочных матриц ковариаций и их нормализации предлагается оценивать нормализованные собственные числа этих матриц. Такой детектор имеет следующие преимущества перед известными. Во-первых, его эффективность близка к оптимальному и, во-вторых, минимизируется вычислительная сложность алгоритма обнаружения. Результаты работы [6] могут рассматриваться здесь как частный случай использования циклических матриц.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема обнаружения в радарах может быть сформулирована в терминах проверки бинарных гипотез

$$\begin{cases} H_1 : \mathbf{r} = \mathbf{u} + \mathbf{c} \\ H_0 : \mathbf{r} = \mathbf{c} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{c}$  обозначают комплексные выборочные векторы размером  $N$ , обозначающие принятый сигнал, отраженный от цели сигнал и помеховый сигнал соответственно. Полезный сигнал  $\mathbf{u}$  моделируется как когерентно импульсная последовательность, т.е.  $\mathbf{r} = \alpha \mathbf{p}$ , где  $\mathbf{p}$  - вектор излученного сигнала, нормированный на единицу,  $\alpha$  - неизвестная комплексная величина, зависящая от свойств среды, где распространяется электромагнитная волна. Помеха моделируется составным гауссовским процессом

$$\mathbf{c}(t) = \mathbf{s}(t)\mathbf{g}(t), \quad (2)$$