

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ РАССЕЯНИЯ ПОМЕХОВЫХ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

д.т.н. Б.В. Храбростин, А.Ф. Катасонов, А.И. Омельченко

Приведены результаты исследования статистических характеристик поляризационных векторов рассеяния комбинированной активно-пассивной помехи и обратного отражения от подстилающей поверхности.

В современной технике радиолокации одним из приоритетных направлений развития является повышение помехозащищенности радиолокационных средств различными средствами. Одним из направлений является применение метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП) для повышения показателей качества обнаружения в сложной помеховой обстановке. В этой связи в рамках метода ППЗП для эффективного решения задач обнаружения на фоне различного типа помех, большой интерес вызывает анализ статистических характеристик мешающих сигналов.

Помехи можно разделить на два класса – активные и пассивные. Кроме того, целесообразно рассмотреть случай одновременного применения активных и пассивных помех – комбинированная помеха (КП). В рамках этой статьи рассматриваются статистические характеристики комбинированной помехи на примере анализа статистических свойств поляризационных векторов рассеивания (ПВР) активной помехи и ПВР облака дипольных отражателей (ОДО), и пассивной помехи на примере анализа статистических свойств поляризационных векторов рассеивания подстилающей поверхности (ПП). Анализ проводится на основе математического моделирования ПВР соответствующих помех.

Для анализа статистических характеристик областей локализации найдем значения вектора математического ожидания $\dot{\vec{\mu}}$ и значения ковариационной поляризационной матрицы (КПМ) ПВР соответствующей помехи, а также вычислим собственные значения и собственные векторы для соответствующих ковариационных матриц. Выражения для нахождения вектора математического ожидания и КПМ имеют вид [1]:

$$\dot{\vec{\mu}} = \mathbf{E} \left\{ \dot{\vec{S}} \right\}; \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{M}} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \left\{ \left(\dot{\vec{S}} - \dot{\vec{\mu}} \right) \cdot \left(\dot{\vec{S}} - \dot{\vec{\mu}} \right)^{\mathbf{T}*} \right\}. \quad (2)$$

Для нахождения вектора математического ожидания $\dot{\hat{\mu}}$ и КПМ $\dot{\hat{M}}$ ПВР соответствующей помехи согласно выражениям (1) и (2) воспользуемся формулами для оценки числовых характеристик случайных величин по ограниченному числу опытов [1].

Оценкой вектора математического ожидания для ПВР $\dot{\hat{S}}$ является среднее арифметическое измеренных значений

$$\dot{\hat{\mu}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \dot{\hat{S}}_m. \quad (3)$$

Эта оценка состоятельна [1] согласно закону больших чисел, при увеличении числа опытов m она сходится по вероятности к математическому ожиданию ПВР. Такая оценка является несмещенной. Для оценки ковариационной матрицы можно взять оценку [1]:

$$\dot{\hat{M}} = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{i=1}^m \left(\dot{\hat{S}} - \dot{\hat{\mu}} \right) \cdot \left(\dot{\hat{S}} - \dot{\hat{\mu}} \right)^T. \quad (4)$$

Такая оценка для КПМ будет являться состоятельной и несмещенной [1].

Для анализа статистических характеристик ПВР комбинированной помехи (КП) воспользуемся данными математического моделирования для частично поляризованной активной помехи (индекс поляризации $m = 0,85$) и результатами математического моделирования отражения от ОДО [7].

Положим, что сигналы активной и пассивной помехи, принимаемые РЛС, независимы. В этом случае КП можно рассматривать как аддитивную смесь сигналов активной и пассивной помех принимаемых РЛС. В этой связи, целесообразно ввести величину, характеризующую вклад активной и пассивной составляющих в КП. Пусть такой величиной будет отношение активная / пассивная помеха:

$$q^2_{a/p} = P_a / P_p. \quad (5)$$

Вначале рассмотрим случай, когда $q^2_{a/p} \approx 0$ дБ. По выборке из независимых во времени элементов в 500 отсчетов получены оценка КПМ $\dot{\hat{M}}_{кп}$ ПВР, соответствующие ей вектор собственных значений $\dot{\hat{\lambda}}_{кп}$, вектор процентного отношения каждого собственного значения к следу КПМ КП $\dot{\hat{\lambda}}_{кп}\%$ и собственные векторы $\dot{\hat{b}}_{кп1...4}$. Результаты расчета представлены ниже:

$$\dot{\hat{M}}_{кп} = \begin{pmatrix} 1.859 & -0.043 - 0.055i & 0.865 - 0.051i & -0.077 - 0.512i \\ -0.043 + 0.055i & 1.99 & 1.004 + 0.048i & 0.905 - 0.137i \\ 0.865 + 0.051i & 1.004 - 0.048i & 1.896 & -0.089 - 0.16i \\ -0.077 + 0.512i & 0.905 + 0.137i & -0.089 + 0.16i & 1.89 \end{pmatrix};$$

$$\bar{\lambda}_{\text{кп}} = \begin{vmatrix} 3.539 \\ 2.452 \\ 1.326 \\ 0.318 \end{vmatrix}; \quad \bar{\lambda}_{\text{кп}\%} = \begin{vmatrix} 46.353 \\ 32.109 \\ 17.372 \\ 4.167 \end{vmatrix}; \quad \dot{\bar{b}}_{\text{кп1}} = \begin{vmatrix} 0.313 - 0.24i \\ 0.585 + 0.039i \\ 0.535 - 0.158i \\ 0.364 + 0.239i \end{vmatrix};$$

$$\dot{\bar{b}}_{\text{кп2}} = \begin{vmatrix} -0.167 + 0.528i \\ 0.392 - 0.244i \\ 0.214 + 0.392i \\ 0.086 - 0.522i \end{vmatrix}; \quad \dot{\bar{b}}_{\text{кп3}} = \begin{vmatrix} -0.047 - 0.616i \\ -0.107 + 0.312i \\ 0.306 + 0.236i \\ -0.203 - 0.564i \end{vmatrix}; \quad \dot{\bar{b}}_{\text{кп4}} = \begin{vmatrix} -0.354 + 0.174i \\ -0.578 + 0.017i \\ 0.579 - 0.066i \\ 0.4 + 0.102i \end{vmatrix}.$$

Анализируя полученные результаты можно сказать, что максимум энергии принятого сигнала соответствует первым двум собственным значениям КПМ КП 78,5 %. При этом вертикальной согласованной составляющей поляризации соответствует 24,38 % энергии принятого сигнала, горизонтальной согласованной поляризации соответствует 24,73 % принятого сигнала. На согласованные поляризации приходится 49,12 % энергии принятого сигнала. На деполяризованную составляющую приходится 50,88 %. Это видно из анализа величин собственного значения и собственных векторов КПМ КП. Таким образом, можно сказать, что принятый сигнал является частично поляризованным. ПВР КП локализуется в четырехмерном комплексном поляризационном пространстве и представляет собой эллипсоид. Направления полуосей эллипсоида совпадают по направлению с собственными векторами $\dot{\bar{b}}_{\text{кп1...4}}$, а их величины соответствуют величинам собственных значений КПМ КП $\lambda_{\text{кп1...4}}$.

При уменьшении значения $q^2_{\text{а/п}}$ величина оси эллипсоида, соответствующая направлению собственного вектора $\dot{\bar{d}}_{\text{кп4}}$ и равная по величине собственному значению $\lambda_{\text{кп4}}$, уменьшается. При $q^2_{\text{а/п}} \approx 14,1$ дБ эллипсоид можно считать трехмерным, так как значение $\lambda_{\text{кп4}}$ становится меньше 2 % от величины следа КПМ КП [6].

При увеличении значения $q^2_{\text{а/п}}$ уменьшается величины осей эллипсоида, соответствующих направлениям собственных векторов $\dot{\bar{b}}_{\text{кп3}}$ и $\dot{\bar{b}}_{\text{кп4}}$, и равных по величине $\lambda_{\text{кп3}}$ и $\lambda_{\text{кп4}}$. При $q^2_{\text{а/п}} \approx 14,1$ дБ эллипсоид можно считать двухмерным, так как сумма $\lambda_{\text{кп3}}$ и $\lambda_{\text{кп4}}$ составляет меньше 2 % от следа КПМ КП. При этом область локализации представляет собой эллипс, главная ось которого совпадает с направлением собственного вектора $\dot{\bar{b}}_{\text{кп1}}$, величина главной оси эллипса соответствует

величине собственного значения КПМ КП $\lambda_{кп1}$. Направление малой оси эллипса локализации ПВР совпадает с направлением собственного вектора $\dot{\mathbf{b}}_{кп2}$, а величина малой оси соответствует величине собственного значения КПМ КП $\lambda_{кп2}$.

Анализ статистических характеристик ПВР подстилающей поверхности проведем на основе экспериментальных данных по исследованию обратного отражения подстилающих поверхностей различных типов [2, 3]. Рассмотрим подстилающие поверхности без доминирующих отражающих элементов, так как для этого типа поверхностей экспериментальные данные наиболее полно описаны. Данные по измерению ПВР подстилающих поверхностей авторам неизвестны. Но достаточно хорошо исследованы отражающие свойства подстилающих поверхностей на ортогональных (вертикальной и горизонтальной) и кроссовых к ним поляризациях. В [2, 3] отмечается, что удельная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) на вертикальной поляризации на 5...10 дБ выше, чем на горизонтальной, практически для всех типов подстилающих поверхностей в сантиметровом диапазоне волн. Исключением являются поверхности с доминирующим отражающим элементом [2]. Отражения на перекрестных поляризациях меньше на 7...12 дБ [2, 3]. В [2, 3] приводятся значения удельных ЭПР для различных типов подстилающей поверхности на вертикальной поляризации при излучении и приеме.

Учитывая характеристики РЛС, можно найти значение ЭПР $\sigma_{п}$ участков подстилающих поверхностей, входящих в разрешаемый объем локатора согласно формуле [4]:

$$\sigma_{п} = \sigma_{уд} \cdot D \cdot \delta\beta \cdot \delta D \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon}, \quad (6)$$

где $\delta\beta \approx \Theta_{-3дБ}$; D – наклонная дальность до цели; δD – разрешающая способность РЛС по дальности; ε – угол облучения.

Моделирование выборки ПВР проводилось для участка подстилающей поверхности, покрытого травой, при этом для расчета ЭПР подстилающей поверхности были выбраны наиболее общие для большинства РЛС характеристики, а именно, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\Theta_{-3дБ} = 0.5^\circ$, разрешающая способность по дальности

$\delta D = 100$ м, угол облучения был выбран 1° , дальность $D = 10$ км.

Моделирование отраженного сигнала от подстилающей поверхности осуществлялось методом статистического моделирования, используя подход, описанный в [5]. Суть заключается в следующем. Амплитуда принятого сигнала представляется в виде

$$\dot{S}_{к/}(t) = \sqrt{\sigma_{к/}} \cdot e^{j\varphi_{к/}(t)}, \quad (7)$$

где $\dot{S}_{kl}(t)$ $k, l = (\overline{1,2})$ – комплексная амплитуда принятого сигнала от подстилающей поверхности при облучении на k -й ортогональной и приеме на l -й ортогональной поляризациях; σ_{kl} и Φ_{kl} – ЭПР и фаза подстилающей поверхности при облучении на k -й ортогональной и приеме на l -й ортогональной поляризациях.

Согласно известным данным экспериментальных исследований [2], мгновенные амплитуды сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, распределены по закону Рэлея. В этой связи, моделирование мгновенных значений амплитуд осуществлялось с помощью датчика случайных чисел, генерирующего случайную последовательность, имеющую распределение Рэлея. При этом в качестве дисперсии целесообразно выбрать ЭПР участка моделируемой поверхности, для соответствующей поляризации на прием и передачу. Значения этих ЭПР можно вычислить на основе экспериментальных данных. Расчет для вертикальной поляризации на передачу и прием осуществлялся согласно выражению (6) на основе экспериментальных данных. Соответствующие величины для других поляризаций можно рассчитать, зная соотношения для уровня отражений на соответствующих поляризациях [2]. А именно, значение ЭПР на горизонтальной поляризации на передачу и прием на 5...10 дБ ниже, чем на вертикальной [2], значение ЭПР на крсовых поляризациях на 7...12 дБ ниже, чем на соответствующих согласованных [2].

Для подстилающей поверхности с травяным покрытием по выборке из независимых элементов в 500 отсчетов рассчитаны оценка КПМ $\dot{M}_{пп}$ ПВР, соответствующие ей вектор собственных значений $\bar{\lambda}_{пп}$, вектор процентного отношения каждого собственного значения к следу КПМ ПП $\lambda_{пп\%}$ и собственные векторы $\dot{b}_{пп1...4}$. Результаты расчета представлены ниже:

$$\dot{M}_{пп} = \begin{vmatrix} 26,765 & 4,156 + 0,847i & 7,426 + 1,525i & 5,061 - 8,009i \\ 4,156 - 0,847i & 0,842 & 1,412 & 0,611 - 1,613i \\ 7,426 - 1,525i & 1,412 & 2,773 & 1,091 - 2,897i \\ 5,061 + 8,009i & 0,611 + 1,613i & 1,091 + 2,897i & 4,734 \end{vmatrix};$$

$$\bar{\lambda}_{пп} = \begin{vmatrix} 33,238 \\ 1,329 \\ 0,464 \\ 0,084 \end{vmatrix}; \quad \bar{\lambda}_{пп\%} = \begin{vmatrix} 94,655 \\ 3,786 \\ 1,32 \\ 0,24 \end{vmatrix}; \quad \dot{b}_{пп1} = \begin{vmatrix} 0,865 - 0,222i \\ 0,132 - 0,064i \\ 0,236 - 0,115i \\ 0,243 + 0,229i \end{vmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{b}}_{\text{nn}2} = \begin{pmatrix} -0,37 + 0,212i \\ 0,104 - 0,093i \\ 0,228 - 0,204i \\ 0,704 + 0,394i \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{b}}_{\text{nn}3} = \begin{pmatrix} -0,121 - 0,061i \\ 0,249 + 0,064i \\ 0,826 + 0,231i \\ -0,036 - 0,423i \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{b}}_{\text{nn}4} = \begin{pmatrix} 0,024 - 0,03i \\ -0,45 + 0,831i \\ 0,156 - 0,278i \\ 0,06 + 0,006i \end{pmatrix}.$$

Здесь $\dot{\mathbf{M}}_{\text{nn}}$ – ковариационно-поляризационная матрица подстилающей поверхности (КПМ ПП), $\bar{\lambda}_{\text{nn}\%}$ – вектор процентного отношения каждого собственного значения к следу КПМ ПП.

Анализируя полученные результаты можно сказать, что подстилающая поверхность является слабо деполаризующей целью. Это следует из того, что максимум энергии принятого сигнала соответствует первым двум собственным значениям КПМ ПП 98,4 %. При этом вертикальной составляющей поляризации соответствует 76,2 % энергии принятого сигнала, горизонтальной поляризации соответствует 13,3 % энергии принятого сигнала. Таким образом, на согласованные поляризации приходится не менее 89,5 % энергии принятого сигнала. На деполаризованную составляющую приходится не более 10,5 % принятого сигнала. Это видно из анализа величин собственных значений и собственных векторов КПМ ПП. Полученные результаты согласуются с результатами экспериментальных исследований, представленных в [2, 3]. Таким образом, можно сказать, что максимум энергии ПВР не менее 98,5 %, локализуется в двухмерном комплексном поляризационном пространстве. Область локализации представляет собой эллипс, главная ось этого эллипса совпадает с направлением собственного вектора $\dot{\mathbf{b}}_{\text{nn}1}$, величина главной оси эллипса соответствует величине собственного значения КПМ ПП $\lambda_{\text{nn}1}$. Направление малой оси эллипса локализации ПВР совпадает с направлением собственного вектора $\dot{\mathbf{b}}_{\text{nn}2}$, а величина малой оси соответствует величине собственного значения КПМ ПП $\lambda_{\text{nn}2}$.

Логично предположить, что для каждого типа подстилающей поверхности соответствующие области локализации ПВР должны отличаться. Однако на значение ПВР подстилающей поверхности оказывает влияние огромное количество различных факторов. Например, сезон, температура окружающего воздуха, влажность, сила ветра, время дня и т.д. Зависимость отражающей способности подстилающей поверхности от условий измерений и окружающей среды согласно данным экспериментальных исследований имеет следующий вид. В весенне-летний период уровень отражений возрастает на 10...20 дБ по сравнению с осенне-зимним, причем максимум отражений приходится на июнь – июль. Эта зависимость связана с увеличением растительного покрова, причем основную роль играет содержание влаги. Весьма существенно влияние

погодных условий на уровень отражений от подстилающей поверхности. После дождя, обратное отражение от травяного покрова возрастает примерно на 3 дБ, а от листовенного покрова в среднем на 5 дБ, по сравнению с сухой погодой [2]. В [2,3] указывается, что обратное отражение на вертикальной поляризации на 5...10 дБ больше чем на горизонтальной, кроме случая отражения от поверхности, покрытой травой. В последнем случае немного увеличивается уровень отражений на горизонтальной поляризации, но он меньше, чем на вертикальной на 4...7 дБ. Соотношение для кроссовых составляющих поляризаций так же постоянно и составляет на 7...12 дБ меньше, чем на согласованной поляризации. Поэтому можно сделать вывод о том, что формы области локализации для подстилающих поверхностей различных типов будут отличаться лишь размерами, а форма будет практически неизменна. Это утверждение подтверждается результатами расчетов.

Полученные результаты исследований статистических характеристик ПВР различных помех могут быть использованы для решения задачи повышения помехоустойчивости радиотехнических средств, в которых реализован принцип полного поляризационного зондирования пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вентцель Е.С., Очаров Л.А. Теория вероятности и её инженерное приложение.* – М.: Наука, 1988. – 450 с.
2. *Кулёмин Е.С., Разказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами.* – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.
3. *Бакулев П.А., Степин В.Н. Методы и устройства селекции движущихся целей.* – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.
4. *Финкельштейн М.И. Основы радиолокации.* – М.: Сов. радио, 1983. – 496 с.
5. *Леонов А.И., Васенов В.Н., Гайдуков Ю.И. Моделирование в радиолокации.* – М.: Сов. радио, 1983. – 246 с.
6. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности : Справ. изд. / С.А. Айвозян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Ф. Мешалкин / под ред. С.А. Айвозяна.* – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
7. *Храбростин Б.В., Мартыничук А.А., Лукьянчук В.В. Исследование областей локализации поляризационных векторов рассеяния облака дипольных отражателей // Радиотехника.* – Харьков: ХГТУРЭ. – 2000. – № 115. – С. 22 – 27.

Поступила 18.07.2002

ХРАБРОСТИН Борис Владимирович, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1969 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – исследование в области обработки радиолокационной информации с использованием поляризационных отличий.

КАТАСОНОВ Александр Федорович, адъюнкт ХВУ. В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов – исследование возможности использования поляризационных различий для обнаружения объектов при воздействии различных типов помех.

ОМЕЛЬЧЕНКО Андрей Игоревич – старший научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов – обнаружение объектов на фоне подстилающей поверхности по поляризационным отличиям.