

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МНОГОЧАСТОТНЫХ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО- МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОБЛАСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИЗМЕРЕННЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ**

А.А. Мартынчук, Г.Н. Качуровский, Г.Н. Зубрицкий, О.Л. Смирнов  
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

*Приведены результаты исследования влияния основных параметров зондирующих ортогональных сигналов на элементы ковариационной поляризационной матрицы поляризационного вектора путем оценки различий исходной области локализации и полученной по результатам измерения.*

*зондирующие ортогональные сигналы, ковариационная поляризационная матрица, поляризационный вектор*

**Введение.** Повышение помехозащищенности РЛС возможно за счет использования метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП), предполагающего использование двух ортогональных сигналов, излучаемых на разных поляризациях [1]. Применительно к моноимпульсному способу определения поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) возникает потребность в рассмотрении возможности применения сложных сигналов. Использование ортогональных многочастотных ЛЧМ (МЧЛЧМ) сигналов для моноимпульсного способа определения элементов ПМР в известной литературе [1 – 3] рассмотрено недостаточно. В частности, не изучено влияние параметров сигналов на элементы ковариационной поляризационной матрицы (КПМ) поляризационного вектора по результатам измерений. В свою очередь, ошибки определения элементов КПМ имеют решающее значение при использовании метода ППЗП при решении различных задач радиолокации, таких как обнаружение цели, обнаружение-распознавание, обнаружение-измерение, причем преимущественно на фоне различного рода помех. Поэтому задача исследования влияния основных параметров ортогональных МЧ ЛЧМ сигналов на области локализации измеренных поляризационных векторов является актуальной.

Анализ параметров областей локализации (ОЛ) исходных и измеренных поляризационных векторов рассеяния возможен за счет известной методики исследования оцениваемых поляризационных векторов (ПВ) сигналов. Исходными данными являются КПМ  $\dot{M}$  и  $\dot{M}'$ , вектора

математического ожидания ПВ  $\dot{\mu}$ ,  $\dot{\mu}'$ . Данные величины находятся на основании поляризационного вектора сигналов.

На соответствующих выходах измерителя ПВ [4], сигналы основных и кроссовых компонент пропорциональны значениям корреляционным интегралам МЧ ЛЧМ зондирующих сигналов

$$\dot{Z}_{11}^{(22)}(t-\tau, F) = \int_{-\frac{\tau_u}{2}}^{\frac{\tau_u}{2}} \left( \dot{S}_{11}^{(22)} \dot{u}_1^{(2)}(t) + \dot{S}_{12}^{(21)} \dot{u}_2^{(1)}(t) \right) \dot{u}_1^{*(2)}(t-\tau, F) dt, \quad (1)$$

$$\dot{Z}_{12}^{(21)}(t-\tau, F) = \int_{-\frac{\tau_u}{2}}^{\frac{\tau_u}{2}} \left( \dot{S}_{12}^{(21)} \dot{u}_2^{(1)}(t) + \dot{S}_{11}^{(22)} \dot{u}_1^{(2)}(t) \right) \dot{u}_2^{*(1)}(t-\tau, F) dt, \quad (2)$$

где  $\dot{u}_1(t)$ ,  $\dot{u}_2(t)$  – зондирующие МЧЛЧМ сигналы;  $\dot{S}_{ij}$  – элементы ПМР.

Аналитическая форма записи МЧ ЛЧМ сигналов имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{u}_1(t) = e^{j\left(\pi \frac{\Delta f}{\tau_u} t^2 + M_\varphi \cdot \sin(2\pi F_m t)\right)} e^{j2\pi f_0 t}, & \text{при } -\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2}; \\ \dot{u}_2(t) = e^{-j\left(\pi \frac{\Delta f}{\tau_u} t^2 + M_\varphi \cdot \sin(2\pi F_m t)\right)} e^{j2\pi f_0 t}, & \text{при } -\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $f_0$  – несущая частота;  $\Delta f$  – девиация;  $\tau_u$  – длительность сигнала;  $M_\varphi$  – индекс фазовой модуляции;  $F_m$  – частота фазовой модуляции.

Выражения (1, 2) приведем в соответствие к определению поляризационной матрицы рассеяния [5] пользуясь матричным аппаратом. Измеренные элементы ПМР  $\dot{S}'$ , с учетом линейного оператора характеризующего корреляционную обработку  $\dot{K}(\tau, F, \alpha)$ , примут вид

$$\dot{S}'(\tau, F, \alpha) = \dot{S} \cdot \dot{K}(\tau, F, \alpha), \quad (4)$$

где  $\dot{S}$  – исходная ПМР;

$$\dot{K}(\tau, F, \alpha) = \begin{pmatrix} \sqrt{|\dot{r}_{11}(\tau, F, \alpha)|} \cdot e^{j\frac{\Psi_{11}(\tau, F, \alpha)}{2}} & \sqrt{|\dot{r}_{12}(\tau, F, \alpha)|} \cdot e^{j\frac{\Psi_{12}(\tau, F, \alpha)}{2}} \\ \sqrt{|\dot{r}_{21}(\tau, F, \alpha)|} \cdot e^{j\frac{\Psi_{21}(\tau, F, \alpha)}{2}} & \sqrt{|\dot{r}_{22}(\tau, F, \alpha)|} \cdot e^{j\frac{\Psi_{22}(\tau, F, \alpha)}{2}} \end{pmatrix};$$

$\dot{r}_{11}(\tau, F, \alpha)$ ,  $\dot{r}_{22}(\tau, F, \alpha)$  – автокорреляционные функции сигналов (3) [6];

$\dot{r}_{12}(\tau, F, \alpha)$ ,  $\dot{r}_{21}(\tau, F, \alpha)$  – взаимокорреляционные функции  $\dot{u}_1(t)$ ,  $\dot{u}_2(t)$  [6];

$\Psi_{11}(\tau, F, \alpha) = \arg(\dot{r}_{11}(\tau, F, \alpha))$ ,  $\Psi_{22}(\tau, F, \alpha) = \arg(\dot{r}_{22}(\tau, F, \alpha))$ ,  $\Psi_{12}(\alpha) = \arg(\dot{r}_{12}(\alpha))$ ,

$\Psi_{21}(\tau, F, \alpha) = \arg(\dot{r}_{21}(\tau, F, \alpha))$  – полные фазы соответствующих корреляцион-

ных функций;  $\tau, F$  – рассогласования по времени и частоте;  $\alpha$  – вектор параметров, от которого зависят корреляционные функции, полученный согласно [6].

Получим ПВ  $\bar{S}$ , а на основании (4) –  $\dot{S}'(\tau, F, \alpha)$ , элементы которых соответствуют ПМР  $\dot{S}$  и  $\dot{S}'(\tau, F, \alpha)$  [1]

$$\bar{S} = (\dot{S}_{11}; \dot{S}_{21}; \dot{S}_{12}; \dot{S}_{22})^T; \quad \bar{S}'(\tau, F, \alpha) = (\dot{S}'_{11}(\tau, F, \alpha); \dot{S}'_{21}(\tau, F, \alpha); \dot{S}'_{12}(\tau, F, \alpha); \dot{S}'_{22}(\tau, F, \alpha))^T;$$

вектор математического ожидания ПВ  $\bar{S}'(\tau, F, \alpha)$  определяется  $\dot{\mu}' = E\{\dot{S}'\}$ .

Пользуясь теоремами о числовых характеристиках функций случайных величин [7], выражением (4), заменой переменных, функциональная зависимость вектора математического ожидания приобретает вид

$$\dot{\mu}'(\tau, F, \alpha) = \dot{Q}_c(\tau, F, \alpha) \cdot \dot{\mu} \quad (5)$$

где  $\dot{Q}_c(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dot{K}_{12}^*(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dot{K}_{12}^*(\alpha) \\ \dot{K}_{12}(\alpha) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dot{K}_{12}(\alpha) & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \alpha = [M_\varphi, \Delta f]$  – вектор

параметров для МЧ ЛЧМ сигналов [6];  $\dot{K}_{12}(\alpha = [M_\varphi, \Delta f]) = \sqrt{\dot{r}_{12}(M_\varphi, \Delta f)}$ ;  $\dot{r}_{12}(M_\varphi, \Delta f)$  – ВКФ сигналов, определяемая согласно [6].

Согласно определению корреляционного момента системы случайных комплексных величин [7], запишем КПМ следующим образом

$$\dot{M}' = E\left\{ \left( \dot{S}'(\tau, F, \alpha) - \dot{\mu}'(\tau, F, \alpha) \right) \cdot \left( \dot{S}'(\tau, F, \alpha) - \dot{\mu}'(\tau, F, \alpha) \right)^{*T} \right\},$$

где  $E\{\}$  – математическое ожидание; \* – знак комплексного сопряжения.

Используя теорему о числовых характеристиках функций случайных величин [7], (4), (5), возможно получение выражения  $\dot{M}'$ :

$$\dot{M}'(\tau, F, \alpha) = \dot{Q}_c(\tau, F, \alpha) \cdot \dot{M} \cdot \dot{Q}_c^{*T}(\tau, F, \alpha), \quad (7)$$

где  $\dot{M}$ ,  $\dot{M}'$  – исходная и найденная в процессе измерения КПМ.

Проведенные в [6] исследования показывают, что ошибки измерения элементов ПМР будут потенциальными при согласованности по времени запаздывания и частоте  $\tau, F$  ожидаемым. Соответственно потенциальными будут и ошибки определения КПМ. Рассмотрим этот случай. При выборе параметров сигналов свойственны ограничения на разрешающие способности по времени и частоте, длительность и ширину спектра сигналов. Для данных сигналов известно соотношение ширины спектра, индекса фазовой модуляции и девиации парциального ЛЧМ импульса –  $\Delta f_c = (2M_\varphi + 1)\Delta f$

[2]. Это позволяет заменой переменных  $\Delta f = \Delta f_c / (2M_\varphi + 1)$ , оценивать степень искажения КПМ ПВР цели функцией одной переменной  $M_\varphi$ , при заданных ограничениях, в частности  $\Delta f_c$ . Оценку и анализ искажения ОЛ ПВ цели произведем согласно J-критерия

$$J(M_\varphi, \dot{M}) = \left[ 1 - \frac{1}{n} \text{Sp} \left( \frac{\dot{M}'(M, M_\varphi)}{\dot{M}} \right) \right] \cdot 100\% .$$

Показателем пространственных различий двух ОЛ используем вектор разности  $\vec{\Theta}$  комплексных углов между собственными векторами матриц  $\dot{M}'$  и  $\dot{M}$

$$\Delta \vec{\Theta}(M_\varphi, \dot{M}) = \left| \vec{\Theta}'(M_\varphi, \dot{M}) - \vec{\Theta} \right| ,$$

где  $\vec{\Theta}$  – вектор комплексных углов между соответствующими собственными векторами  $\vec{b}$  матрицы  $\dot{M}$ , рассчитываемый согласно выражения

$$\Theta_i = \arccos \left( \vec{b}_i, \vec{b}_i' \right) = -j \text{Ln} \left[ \left( \vec{b}_i, \vec{b}_i' \right) + \sqrt{\left( \vec{b}_i, \vec{b}_i' \right)^2 - 1} \right] ; \vec{\Theta}'(M_\varphi, \dot{M}) - \text{матрицы } \dot{M}' .$$

Также используем вектор процентных соотношений  $\vec{P} = \frac{1}{\text{Sp}(\dot{M})} (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) \cdot 100\%$ , для получения относительного значения изменения соотношений собственного числа к следу матрицы и характеризующий распределение элементов поляризационного вектора вдоль направляющих ортов области локализации:

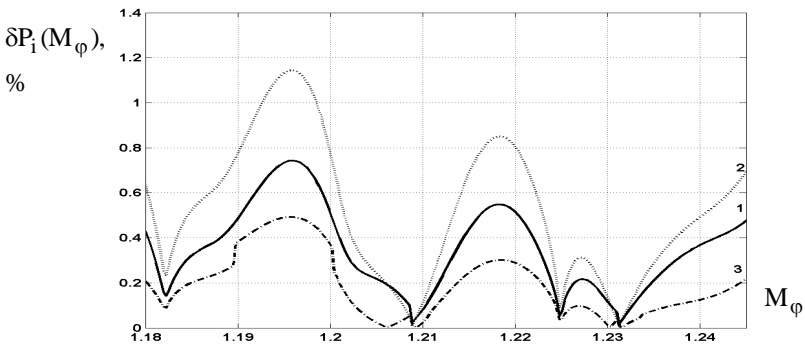
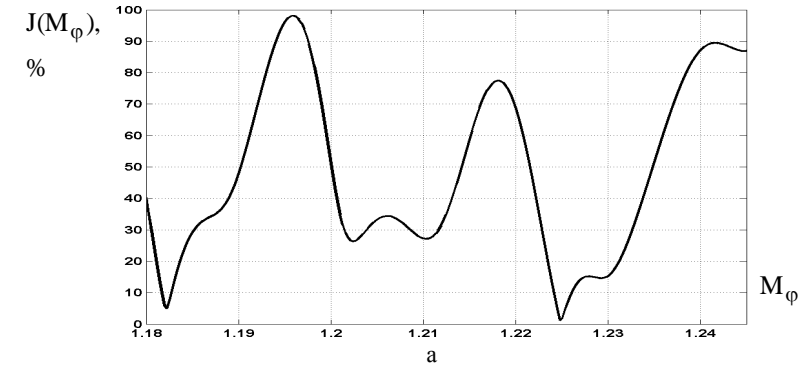
$$\delta \vec{P}(M_\varphi, \dot{M}) = \frac{1}{\text{Sp}(\dot{M})} (\Delta \lambda_1(M_\varphi, \dot{M}), \Delta \lambda_2(M_\varphi, \dot{M}), \Delta \lambda_3(M_\varphi, \dot{M}), \Delta \lambda_4(M_\varphi, \dot{M})) \cdot 100\% ,$$

где  $\Delta \lambda_i(M_\varphi, \dot{M}) = \lambda_i'(M_\varphi, \dot{M}) - \lambda_i, i = 1, 4; \lambda_i'(M_\varphi, \dot{M})$  – собственные числа матрицы  $\dot{M}' = (\dot{M}_\varphi, \dot{M})$ ;  $\lambda_i$  – собственные числа матрицы  $\dot{M}$ .

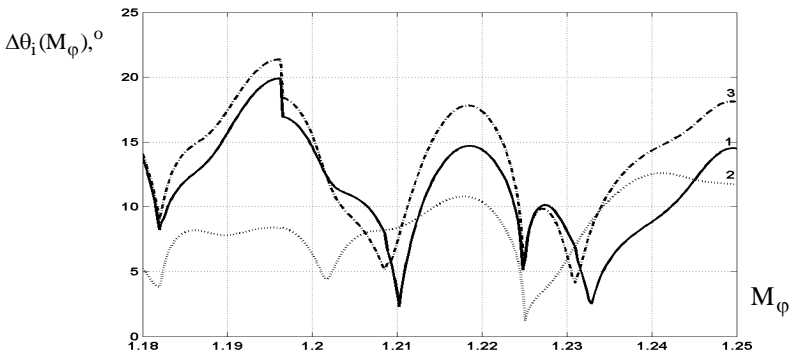
В качестве КПМ используем сильнодеполяризирующую цель типа «МиГ-29»:

$$\dot{M} = \begin{pmatrix} 2,8907 & -1,2113 - 0,0110i & -1,2113 - 0,0110i & -1,5456 + 0,0032i \\ -1,2113 + 0,0110i & 1,5340 & 1,5340 & 1,1835 - 0,0817i \\ -1,2113 + 0,0110i & 1,5340 & 1,5340 & 1,1835 - 0,0817i \\ -1,5456 - 0,0032i & 1,1835 + 0,0817i & 1,1835 + 0,0817i & 1,61 \end{pmatrix} \cdot M^2 .$$

Для примера на рис. 1 представлены зависимость степени искажения ОЛ ПВР цели от индекса фазовой модуляции при постоянстве ширины спектра сигналов, длительности, разрешающих способностей по частоте и времени.



б – 1, 2, 3 – отношение 1, 2, 3 собственного числа к следу КПМ соответственно



в – 1, 2, 3 – угол между 1, 2, 3 собственными векторами КПМ  $\dot{M}$  и  $\dot{M}'$  соответственно

Рис. 1. Зависимость искажения ОЛ ПВ от индекса фазовой модуляции при постоянных значениях ширины спектра и длительности сигналов, разрешающих способностей по частоте и времени

Данные зависимости (рис.1) получены для следующих требований к сигналам:  $\delta F = 50$  кГц,  $\delta \tau = 0,0367$  мкс,  $\Delta f_c = 13,61$  МГц,  $\tau_{и} = 20$  мкс.

**Выводы.** Полученные аналитические зависимости и их количественная оценка показывают, что влияние параметров сигналов на степень искажения ОЛ ПВ цели для сильнодеполяризованных целей существенно. Для рассмотренного в статье примера значение  $M_{\phi} = 1,225$  обеспечивает минимальные искажения ОЛ ПВР рассмотренных целей и составляет 0,5 – 1,1% по J-критерию, в отличие от применения ЛЧМ сигналов, для которых искажение достигает 351%. Количественная оценка использования ЛЧМ или МЧ ЛЧМ сигналов на степень искажения КПП ПВ подтверждает целесообразность применения сигналов с более сложной модуляцией. Методика выбора основных параметров сигналов [6] позволяет определить основные параметры сигналов, которые соответствуют минимальности ошибок измерения элементов ПМР. Функциональная зависимость КПП от ПМР ставит в соответствие минимальным ошибкам измерения ПМР минимальность ошибок КПП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Храбростин Б.В., Мартыничук А.А., Зубрицкий Г.Н. Применение метода полного поляризационного зондирования пространства в РЛС // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование. Сб. научн. трудов ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 6, Ч. 1. – 567 с.
2. Гомозов В.И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем. – Х.: Шустов, 2002. – 398 с.
3. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Х., 2003. – 230 с.
4. Спосіб вимірювання поляризаційної матриці розсіювання об'єкта: А.с. 98126624. Україна, МПК 6G01S7/36/ Храбростін Б.В., Кравченко А.И., Мартинчук О.О. (Україна). – № 98126624; Заявлено 02.03.99; Опубл. 07.08.99, Бюл. № 54.
5. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: МАКВИС, 1998. – 828 с.
6. Мартыничук А.А., Качуровский Г.Н., Омельченко А.И. Методика выбора основных параметров ортогональных сигналов с комбинированной параболической и гармонической фазовой модуляцией, при моноимпульсном способе измерения поляризационной матрицы рассеяния // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС. – 2006. – Вип. 3. – С. 142-154.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.

Поступила 13.03.2006

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор Л.Г. Корниенко,  
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.