

## МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЗНОСА НЕСУЩИХ ЧАСТОТ ДВУХ ПРОСТЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПОЛНОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВА

к.в.н. М.Ф. Ботов, к.т.н. А.А. Мартынчук, к.т.н. А.Д. Флоров,  
к.т.н. В.В. Лукьянчук, к.т.н. А.И. Харченко, Д.В. Фоменко

*Предлагается методика выбора разноса несущих частот двух простых зондирующих сигналов для обеспечения одновременного излучения ортогональных сигналов при полном поляризационном зондировании пространства на основе анализа корреляционно-матричных функций поляризационных матриц рассеяния.*

**Постановка задачи.** В настоящее время одним из основных направлений совершенствования существующих радиолокационных станций (РЛС) является повышение их помехозащищенности. В условиях воздействия на РЛС пассивных и активных помех при отсутствии частотных, временных, пространственных различий сигналов и помех обнаружение целей значительно усложняется. В этих условиях возможно использование поляризационных различий, описываемых с помощью поляризационных матриц рассеяния (ПМР), полученных в результате полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП) простыми сигналами на разных частотах. Целесообразность использования простых сигналов при ППЗП обусловлена, в первую очередь, простотой их генерирования и обработки, а значит и стоимостью РЛС в целом. С другой стороны, простые сигналы могут быть предпочтительнее при обнаружении целей на фоне пассивных помех типа подстилающая поверхность. Таким образом, необходимо обосновать требования к разному частот для обеспечения достаточной эффективности обнаружения целей на фоне помех в РЛС с полным поляризационным зондированием пространства простыми сигналами.

**Анализ литературы.** Вопросам поляризационной обработки сигналов посвящено достаточно большое количество работ. В большей части работ исследования посвящены последовательному и моноимпульсному способу измерения элементов ПМР, а возможности остальных способов исследованы в недостаточной мере. Для измерения элементов ПМР известны следующие способы [1, 2]:

– моноимпульсный способ, предполагающий одновременное излучение ортогональных по поляризации и по внутренней структуре широкополосных сложных зондирующих сигналов;

– последовательный во времени способ, предполагающий излучение ортогональных по поляризации в общем случае узкополосных простых зондирующих сигналов на одной несущей частоте  $f_0$ , но в разные моменты времени. В этом случае ортогональность сигналов достигается по времени. При этом способе измерения элементов ПМР методическая ошибка связана с величиной временного разнеса зондирующих сигналов и особенностями динамики цели за время измерения всех элементов ПМР. Следует заметить, что методическая ошибка может быть существенной, если период зондирования обеспечивает однозначное измерение дальности до цели;

– разночастотный способ, предполагающий одновременное излучение ортогональных по поляризации узкополосных зондирующих сигналов, несущие частоты которых  $f_1$  и  $f_2$  разнесены на некоторую величину относительно средней частоты  $f_0$ . При этом методе ортогональность сигналов достигается по частоте;

– последовательно-разночастотный способ, предполагающий излучение в разные моменты времени ортогональных по поляризации узкополосных зондирующих сигналов, несущие частоты которых  $f_1$  и  $f_2$  разнесены на некоторую величину, однако при этом временной разнос двух сигналов может быть существенно меньше периода повторения зондирующих сигналов. При реализации этого метода ортогональность зондирующих сигналов достигается как по времени, так и по частоте.

При измерении элементов ПМР предполагается во всех случаях полный поляризационный прием сигналов с применением ортогональных согласованных фильтров, либо корреляторов по каждой из ортогональных поляризаций.

Как показывает анализ литературы [1, 2], использование элементов ПМР позволяет значительно улучшить качественные показатели эффективности функционирования современных РЛС, а также расширить их функциональные возможности. Однако, как показывают результаты исследований авторов, наилучшими возможностями по обнаружению целей на фоне пассивных и активных помех обладает моноимпульсный способ измерения элементов ПМР, но его реализация требует больших аппаратных затрат. Поэтому представляет интерес исследование сопоставительной эффективности использования других методов полного поляризационного зондирования пространства, например, разночастотного, который по критерию эффективность – стоимость может быть

предпочтительнее моноимпульсного способа измерения элементов ПМР. Применение разночастотного способа предполагает излучение простых сигналов на разных частотах, однако с увеличением разноса частот следует ожидать снижения взаимных корреляций между элементами ПМР [2], что, в свою очередь, приведет к снижению эффективности подавления помех при обнаружении цели. Актуальной в связи с этим становится задача разработки методики выбора разноса несущих частот простых зондирующих сигналов при ППЗП для обеспечения достаточной эффективности обнаружения цели на фоне помех.

**Цель статьи.** Целью статьи является разработка методики выбора разноса частот двух простых ортогональных по поляризации зондирующих сигналов при полном поляризационном зондировании пространства на основе анализа взаимно корреляционных функций элементов поляризационных матриц рассеяний целей.

Методика выбора разноса частот двух простых ортогональных по поляризации зондирующих сигналов при полном поляризационном зондировании пространства основана на переходе от анализа корреляционной функции угла облучения к анализу коэффициента разноса двух частот зондирующих простых сигналов.

Характерной особенностью диаграммы вторичного излучения цели является то, что минимальная ширина диаграммы может быть приближенно оценена по формуле:

$$\Delta\beta = \frac{\lambda}{L} = \frac{c}{f_0 \cdot L}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $L$  – максимальный поперечный либо видимый размер цели;  $c$  – скорость света;  $f_0$  – средняя частота зондирующего сигнала.

Следует отметить, что  $\Delta\beta$  может быть предельным параметром корреляции элементов ПМР по уровню 0,1 разработанной модели. Упрощенный вид корреляционной функции угла облучения может быть записан в таком виде [3]:

$$\rho(\sigma\beta) = e^{-\frac{\sigma\beta}{\pi\Delta\beta}}, \quad (2)$$

где  $\sigma\beta$  – угловая невязка.

Рассмотрим особенности математической модели поляризационной матрицы рассеяния при измерении ее элементов разночастотным способом.

Пусть зондирование пространства осуществляется двумя ортогональными по поляризации зондирующими сигналами, несущие которых разнесены на некоторую величину  $\Delta f$ .

ПМР объекта в собственном базисе, элементы которой зависят от частот в зависимости от угла облучения объекта  $\beta$ , имеет следующий вид:

$$\dot{S}(f_0, \delta f, \beta) = \begin{pmatrix} |\dot{S}_{11}(f_0 \pm \delta f / 2, \beta)| \cdot e^{-j\phi_{11}(f_0 \pm \delta f / 2, \beta)} & 0 \\ 0 & |\dot{S}_{22}(f_0 \mp \delta f / 2, \beta)| \cdot e^{-j\phi_{22}(f_0 \mp \delta f / 2, \beta)} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $|\dot{S}_{ii}(f_0 \pm \delta f / 2, \beta)|$  – модуль (амплитуда), а  $\phi_{ii}(f_0 \pm \delta f / 2, \beta)$  – фаза  $i$ ,  $l$ -го элемента ПМР ( $i, l = 1, 2$ ), причем первый индекс соответствует номеру поляризации приемной антенны, а второй – поляризации излучающей антенны, например 1 – вертикальная линейная поляризация, 2 – горизонтальная линейная поляризация;  $\delta f$  – разнос частот сигналов ортогональных поляризаций;  $\beta$  – угол облучения, как угол между линией визирования и продольной осью объекта.

Для описания поляризационных свойств отраженных сигналов от цели произвольной формы может использоваться так называемая двухвибраторная модель стабильной радиолокационной цели [1]. Расчет параметров отраженной волны в [1] основывается на расчете электродвижущих сил, наводимых в диполях падающей волной. Взаимное влияние диполей не учитывается. Выбор размеров, взаимного положения и ориентации диполей может позволить получить отраженный сигнал с заданного направления с произвольными параметрами эллипса поляризации. Для расширения области применения известной модели разработана модель, учитывающая специфику зависимости автокорреляционной функции поляризационных параметров отраженных сигналов от углов облучения и длины волны (рис. 1) для изучения общих закономерностей взаимосвязи парных элементов ПМР. Порядок расчетов параметров отраженной волны трехвибраторной модели такой же, как и в [1]. При этом вторичными эффектами переизлучения пренебрегаем. Трехвибраторная модель представляет собой совокупность диполей, расположенных следующим образом: диполи 1 и 2 расположены в картинной плоскости и образуют углы, например, 30 и 45 град., соответственно, относительно опорного орта; диполь 3 ориентирован вдоль линии визирования, электрические соединения между диполями отсутствуют.

В данной модели диполь 3 приближенно учитывает влияние отражения от фюзеляжа летательного аппарата, диполи 1 и 2 соответственно приближенно учитывают переизлучение от носовой и хвостовой частей. С помощью разработанной упрощенной модели имеется возможность моделировать корреляционные свойства элементов поляризационных мат-

риц рассеяния на разных частотах и анализировать корреляционно-матричные функции поляризационных матриц рассеяния, подобно модели автокорреляционной функции сигнала с фиксированной поляризацией, рассмотренной в [3].

Результаты математического моделирования вкруговую по углам облучения  $\beta = 0^\circ \dots 180^\circ$  в соответствии с выражением (3) по исследуемой модели приведены ниже. На рис. 2 приведена зависимость модуля элемента  $\dot{S}_{11}$  ПМР от угла облучения модели при зондировании и приеме сигнала на горизонтальной поляризации. На рис. 3 приведены зависимости фазы элемента  $\dot{S}_{11}$  ПМР от угла облучения. На рис. 4 и рис. 5 приведены зависимости модуля и фазы элемента  $\dot{S}_{12}$  при зондировании на горизонтальной поляризации и приеме сигнала на вертикальной поляризации. На рис. 6 и рис. 7 приведены зависимости модуля и фазы элемента  $\dot{S}_{22}$  ПМР от угла облучения при зондировании и приеме сигнала на вертикальной поляризации. На рис. 2 – 7 кривые 1, 2, 3 соответствуют частотам зондирования 10 ГГц, 10,01 ГГц и 10,1 ГГц.

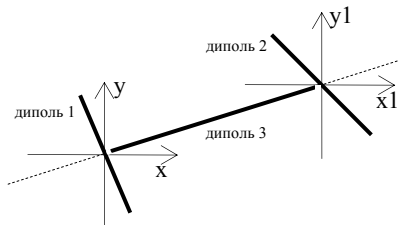


Рис. 1. Порядок расположения элементов трехвибраторной модели

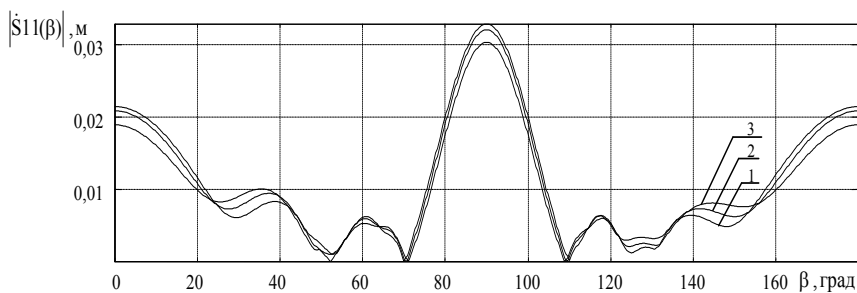


Рис. 2. Зависимость модуля элемента  $\dot{S}_{11}$  ПМР от угла облучения

Из анализа полученных результатов следует, что зависимости модулей элементов ПМР от угла облучения имеет характерный многолепестковый характер. Средняя ширина лепестков согласуется с видимыми электрическими размерами модели и не противоречит известным результатам [3, 4].

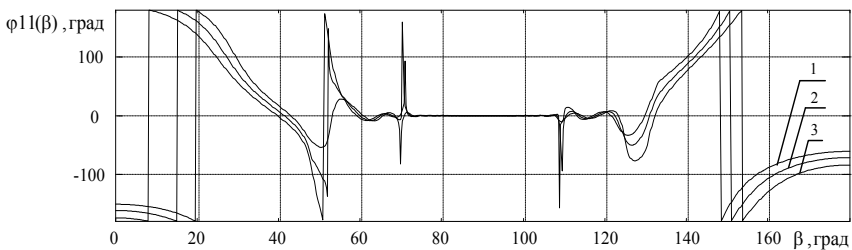


Рис. 3. Зависимость фазы элемента  $\dot{S}_{11}$  ПМР от угла облучения

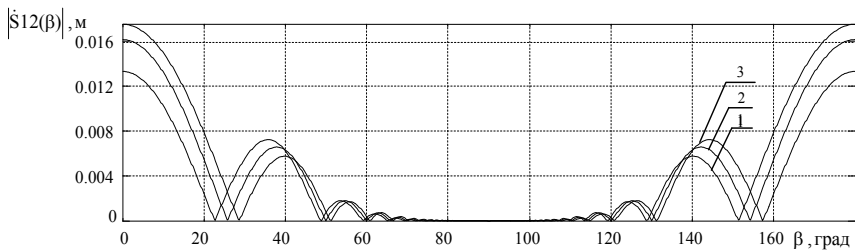


Рис. 4. Зависимость модуля элемента  $\dot{S}_{12}$  ПМР от угла облучения

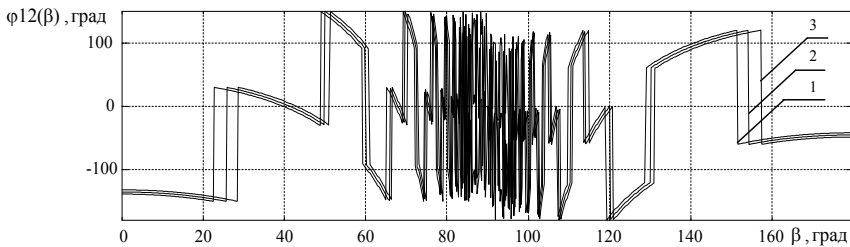


Рис. 5. Зависимость фазы элемента  $\dot{S}_{12}$  ПМР от угла облучения

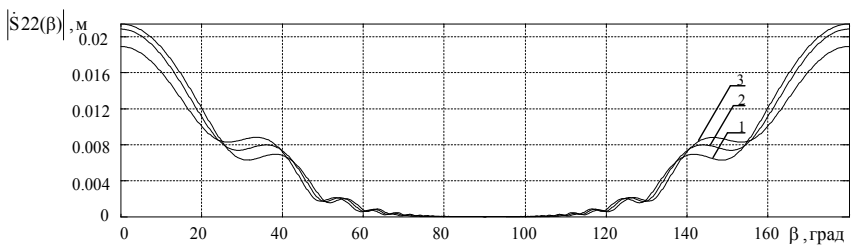


Рис. 6. Зависимость модуля элемента  $\dot{S}_{22}$  ПМР от угла облучения

Так как модули элементов ПМР реального объекта меняются в зависимости от угла облучения в широком диапазоне, то в каждый отдельно взятый момент времени они будут случайными величинами.

Для описания различных случайных процессов, возникающих при излучении сигнала на одной поляризации, но на разных частотах, была использована матрица автокорреляционных и взаимных корреляционных функций (АКФ и ВКФ) [4].

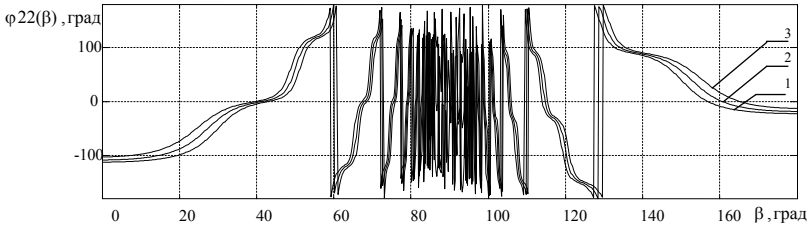


Рис. 7. Зависимость фазы элемента  $\dot{S}_{22}$  ПМП от угла облучения

АКФ определяется выражением:

$$\dot{\rho}_{ii}(\delta f, \delta \beta) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_i(f_i, \beta) \cdot \dot{S}_i^*{}^T(f_i \pm \delta f, \beta + \delta \beta) d\beta df \right|}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_i \cdot \dot{S}_i^* d\beta df}, \quad (4)$$

где  $\dot{S}_i(f_i, \beta)$  – центрированная случайная величина, описывающая изменение величины коэффициента отражения в зависимости от несущей частоты зондирования сигнала и угла облучения объекта; значения  $i = 1, 2$  соответствует горизонтальной и вертикальной поляризации отраженного сигнала.

Для более полного анализа разночастотного способа измерения элементов ПМП, было проведено исследование взаимной корреляционной функции (ВКФ) [3] поляризационных векторов рассеяния (ПВР), полученных моноимпульсным способом и разночастотным. Значения ВКФ в соответствующих сечениях определяются следующими соотношениями:

$$r(\delta f, \delta \beta) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_1(f, \beta) \cdot \dot{S}_2(f \pm \delta f, \beta \pm \delta \beta) d\beta df}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}_i \cdot \dot{S}_j^* d\beta df}, \quad (5)$$

где индекс 1 соответствует ПВР  $\dot{S}_1$ , полученному моноимпульсным способом, индекс 2 – ПВР  $\dot{S}_2$ , полученному разночастотным способом.

На рис. 8 представлены зависимости значений модулей АКФ и ВКФ ПВР от разноса несущих частот. При расчете значений АКФ и ВКФ проводилось усреднение по углу облучения в пределах одного лепестка ( $18 - 20^\circ$ ).

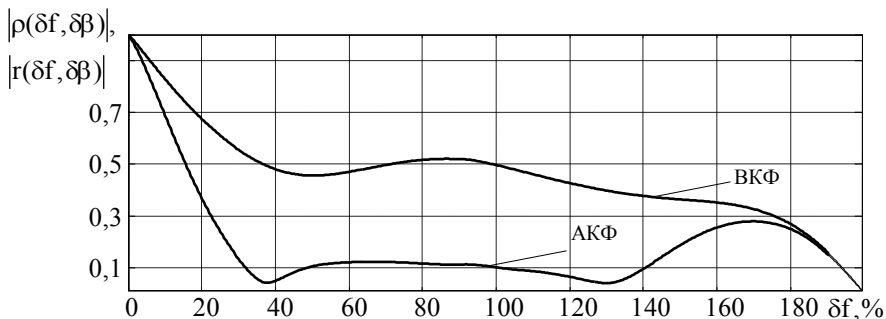


Рис. 8. Зависимости модулей АКФ и ВКФ ПВР от разноса несущих частот

Анализ АКФ и ВКФ позволяет определить некоторый разнос частот, при котором модуль соответствующей функции будет свидетельствовать о наличии существенной для практики корреляции. Например, если считать возможным снижение модуля АКФ до уровня 0,9, то соответствующий разнос частот можно определить величиной 5% от несущей частоты. Для ВКФ разнос частот можно определить величиной 7%.

Для решения задачи оптимизации параметров зондирующих сигналов в интересах использования разночастотного способа измерения элементов ПМР необходимо использовать участок сильной корреляции ПВР, полученных при использовании разных способов измерения элементов ПМР. Зависимости значений модулей АКФ и ВКФ ПВР от разноса несущих частот в пределах от 0 до 10% представлены на рис. 9.

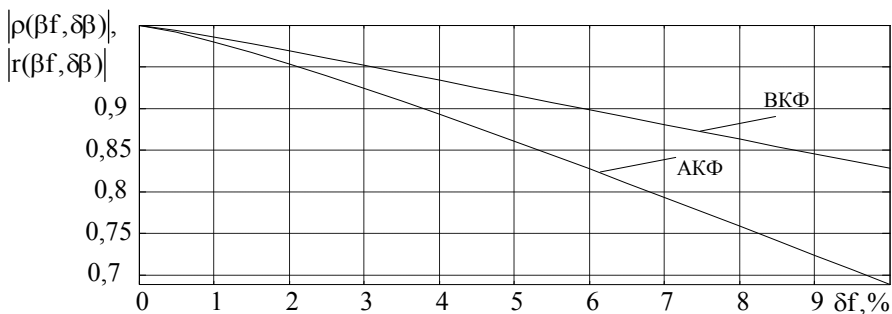


Рис. 9. Зависимости модулей АКФ и ВКФ при  $\Delta f_{\max} = 10\%$

Из анализа зависимостей АКФ и ВКФ следует:



1. Корреляция между ПВР наблюдается в пределах углов, существенно меньших ширины одного лепестка диаграммы обратного вторичного излучения.

2. Значение модуля коэффициента взаимной корреляции пропорционально значению разности частот зондирующих сигналов на разных поляризациях.

3. Степень взаимной корреляции ПВР зависит от частоты зондирующих сигналов и угла облучения, что может быть использовано для выбора оптимального разнеса зондирующих сигналов по частоте.

4. Оптимальный разнос по частоте зондирующих сигналов определяется по уровню сильной корреляции (0,9) ПВР и для рассматриваемой модели составляет 5,5% от несущей частоты сигнала.

5. При выборе разнеса по частоте следует учитывать, что при выбранном разнесе не должно увеличиться время корреляции по углу облучения по сравнению со средней частотой зондирования.

Методика выбора разнеса несущих частот двух простых сигналов при полном поляризационном зондировании пространства разночастотным способом в задаче обнаружения целей на фоне помех может заключаться в следующем:

- проведение анализа зависимости элементов ПМР цели от углов облучения при различной ее ориентации относительно РЛС на различных несущих частотах на основе результатов имитационного моделирования, физического моделирования либо эксперимента в натуральных условиях;

- проведение анализа зависимости элементов ПМР пассивной помехи на различных несущих частотах также на основе результатов имитационного моделирования, физического моделирования либо эксперимента в натуральных условиях;

- получение авто и взаимных корреляционных функций полезных сигналов и помех с аргументом в виде разности (разнеса) частот;

- выбор допустимых величин снижения модулей авто и взаимных корреляционных функций для решения частных заданных задач обнаружения целей на фоне помех, задач обнаружения – распознавания либо задач подавления помех;

- выбор допустимой величины разнеса частот двух простых зондирующих сигналов, соответствующей выбранной величине модулей авто и взаимно корреляционных функций.

**Выводы.** Разработана методика выбора разнеса несущих частот двух простых сигналов при полном поляризационном зондировании пространства. Методика позволяет определить величину допустимого

разноса несущих частот зондирующих сигналов при использовании разночастотного способа измерения элементов ПМР в зависимости от выбранной допустимой величины модулей авто и взаимно корреляционных функций. В результате применения разработанной методики можно обеспечить показатели обнаружения цели на фоне помех, в частности пассивных помех типа подстилающая поверхность, не хуже (на практике), чем при использовании моноимпульсного способа полного поляризационного зондирования пространства и с ожидаемыми меньшими аппаратными затратами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966. – 344 с.
2. Казаков Е.Л. Радиолокационное распознавание космических объектов по поляризационным признакам. – Одесса: Издание ОИУМ, 2003. – 288 с.
3. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов.радио, 1970. – 640 с.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО “МАКВИС”, 1998. – 632 с.

Поступила 13.10.2004

**БОТОВ Михаил Федорович**, канд. воен. наук, заместитель Главнокомандующего Воздушными силами – начальник противовоздушной обороны Воздушных сил ВС Украины. Область научных интересов – модернизация существующих и разработка новых средств радиолокационной разведки.

**ФЛОРОВ Александр Дмитриевич**, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – модернизация существующих и разработка новых средств радиолокационной разведки.

**МАРТЫНЧУК Александр Александрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – использование полного поляризационного зондирования пространства в интересах повышения информативности и помехозащищенности радиолокаторов.

**ЛУКЬЯНЧУК Вадим Владимирович**, канд. техн. наук, начальник НИЛ кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – использование полного поляризационного зондирования пространства в интересах повышения информативности и помехозащищенности радиолокаторов.

**ХАРЧЕНКО Александр Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – использование новых методов в интересах повышения помехозащищенности радиолокаторов.

**ФОМЕНКО Дмитрий Владимирович**, начальник отделения учебно-тренировочного комплекса кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Область научных интересов – использование полного поляризационного зондирования пространства в интересах повышения информативности и помехозащищенности радиолокаторов.