РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-153-161

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРАСТ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ДВУХ ОБЪЕКТОВ

А.И. КОЗЛОВ[1], В.Ю. МАСЛОВ[2]
[1]*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*
[2]*Московский технологический университет, г. Москва, Россия*

В данной статье рассматривается задача нахождения плотности потоков мощности сигналов, отраженных от двух объектов с различными симметричными матрицами рассеяния, при облучении их полностью поляризованной волной. Рассматривается случай, когда собственные значения матрицы различны и приведён вид унитарной диагонализации матрицы для этого случая. Приведено соотношение, определяющее диагональные элементы множителя. Произведено сравнение между собой плотности потоков мощности сигналов, отраженных от двух объектов с различными матрицами рассеяния, при облучении их полностью поляризованной волной. Математически определена плотность потока мощности электромагнитной волны, отраженной этим объектом. На основе определения матрицы рассеяния произведён переход к падающим волнам. Приведён параметр, характеризующий величину степени поляризационной анизотропности флуктуирующего объекта. Дано соотношение для радиолокационного контраста. Сделан вывод, что если вектор падающей электромагнитной волны будет отличаться только скалярным множителем от собственного вектора матрицы, то величина радиолокационного контраста достигнет своего максимального значения. При пропорциональности вектора падающей волны собственному вектору величина радиолокационного контраста достигает своего минимального значения. Рассмотрена задача, когда матрицы рассеяния двух объектов одновременно приводятся к диагональному виду посредством преобразования конгруэнтности. Определены условия, при которых матрицы Грейвса двух рассеивающих объектов приводятся к диагональному виду с помощью конгруэнтного преобразования. Получены необходимое и достаточное условие существования поляризационного базиса, в котором матрицы рассеяния двух объектов будут одновременно иметь диагональный вид.

Ключевые слова: синтезатор частот, делитель с дробно-переменным коэффициентом деления, сигма-дельта модулятор.

ВВЕДЕНИЕ

Все нарастающее использование в радиолокации методов и принципов радиополяриметрии с неизбежностью ставит вопрос о физических пределах ее возможностей для решения как классических, так и специальных задач радиолокации. Одной из центральных в этом плане задач является задача о радиолокационном контрасте двух целей. Именно в этой задаче определяются по существу предельные возможности, которые может обеспечить радиополяриметрия в решении задач обнаружения и распознавания радиолокационных целей. Впервые в такой постановке задача была достаточно в общем виде решена в [1]. Предлагаемое ниже решение расширяет возможности этих результатов и представляется в удобном виде для проведения соответствующих оценок.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача состоит в нахождении плотности потоков мощности сигналов, отраженных от двух объектов с различными симметричными матрицами рассеяния **S**, при облучении их полностью поляризованной волной [2, 16, 18]. Рассмотрим основные свойства симметричной матрицы рассеяния [2].

В этом случае для матрицы **S** задана унитарная диагонализация эрмитовой матрицы [1].

$$\mathbf{G} = \overline{\mathbf{S}}\mathbf{S} = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}^2\mathbf{Q}^*. \tag{1}$$

При этом в общем случае не следует, что матрица **S** может быть представлена в виде

$$\mathbf{S} = \mathbf{Q}\Lambda\mathbf{Q}^{\mathrm{T}}, \tag{2}$$

где $\overline{\mathbf{S}}$ – матрица, составленная из комплексно-сопряженных элементов матрицы **S**; $\mathbf{Q}^*$ – матрица, сопряженная к матрице **Q**; $\mathbf{Q}^{\mathrm{T}}$ – транспонированная матрица **Q**.

В этом случае, если собственные значения матрицы $\overline{\mathbf{S}}\mathbf{S}$ различны и унитарная диагонализация матрицы $\overline{\mathbf{S}}\mathbf{S}$ имеет вид

$$\overline{\mathbf{S}}\mathbf{S} = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}^2\mathbf{Q}^*, \tag{3}$$

где $\mathbf{\Lambda} = \mathrm{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$ – неотрицательная диагональная матрица, то существует такая диагональная матрица $\mathbf{D} = \mathrm{diag}\left(e^{i\vartheta_1/2}, e^{i\vartheta_2/2}\right)$, где $0 \le \vartheta \le 2\pi$, что справедливо разложение

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

с матрицей $\mathbf{U} = \mathbf{Q}\mathbf{D}$.

Диагональные элементы множителя **D** определяются соотношением $\mathbf{S}\overline{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}\mathbf{D}^2$.

Введем положительный параметр $\kappa = \lambda_2/\lambda_1 \ge 1$. Числа λ_1 и λ_2 определяются как неотрицательные квадратные корни из собственных значений матрицы $\mathbf{G} = \mathbf{S}^*\mathbf{S}$. Определяя угол ϕ из первого квадранта формулой $\mathrm{ctg}(\phi/2) = \kappa$, будем иметь

$$\frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} = \frac{\kappa^2 - 1}{\kappa^2 + 1} = \cos\phi, \tag{5}$$

и

$$\sin^2\phi = 1 - \left(\frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}\right)^2 = \frac{4\lambda_1^2\lambda_2^2}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^2}. \tag{6}$$

Определитель $\det(\mathbf{S}^*\mathbf{S}) = \lambda_1^2\lambda_2^2$ и след $\mathrm{Tr}(\mathbf{S}^*\mathbf{S}) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2$ эрмитовой матрицы инвариантны относительно преобразования подобия, поэтому будет справедливо равенство

$$\mathrm{Tr}^2(\mathbf{S}^*\mathbf{S})\sin^2(\phi) = 4\det(\mathbf{S}^*\mathbf{S}), \tag{7}$$

где

$$\begin{gathered} \mathrm{Tr}(\mathbf{S}^*\mathbf{S}) = |s_{11}|^2 + |s_{22}|^2 + 2|s_{12}|^2, \\ \det(\mathbf{S}^*\mathbf{S}) = |s_{11}|^2|s_{22}|^2 - |s_{12}|^4 - \lambda_1\lambda_2\,\mathrm{Re}(s_{12}). \end{gathered} \tag{8}$$

Модуль определителя $|\det(\mathbf{S})| = \lambda_1\lambda_2$ является инвариантом матрицы рассеяния, следовательно,

$$\mathrm{Tr}(\mathbf{S}^*\mathbf{S})\sin(\phi) = 2|\det(\mathbf{S})|, \tag{9}$$

где $\det(\mathbf{S}) = s_{11}s_{22} - s_{12}^2$.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРАСТ

Сравним между собой плотности потоков мощности сигналов, отраженных от двух объектов с различными матрицами рассеяния, при облучении их полностью поляризованной волной [2, 3]. Плотность потока мощности электромагнитной волны, отраженной этим объектом, будет определяться величиной

$$\mathit{П}_\text{о} = \mathbf{E}_\text{о}^*\mathbf{E}_\text{о}. \tag{10}$$

Используя определение матрицы рассеяния $\mathbf{S}$ $(\mathbf{E}_\text{о} = \mathbf{SE}_\text{п})$, перейдем в (5) к падающим волнам, тогда

$$\mathit{П}_\text{о} = (\mathbf{SE}_\text{п})^*\mathbf{SE}_\text{п} = \mathbf{E}_\text{п}^*\mathbf{S}^*\mathbf{SE}_\text{п} = \mathbf{E}_\text{п}^*\mathbf{GE}_\text{п}, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{G} = \mathbf{S}^*\mathbf{S}. \tag{12}$$

Столбцы матрицы $\overline{\mathbf{Q}}$ являются ортонормированными собственными векторами $\mathbf{u}$ и $\mathbf{v}$ матрицы $\mathbf{G}$, отвечающими соответственно собственным значениям λ_1^2 и λ_2^2:

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \cos\gamma \\ -\sin\gamma e^{i\varphi} \end{pmatrix}, \tag{13}$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \sin\gamma e^{-i\varphi} \\ \cos\gamma \end{pmatrix}. \tag{14}$$

Для собственных векторов эрмитовых матриц (с точностью до произвольного множителя) справедливы соотношения

$$\lambda_1^2 = \mathbf{u}^*\mathbf{Gu},\ \lambda_2^2 = \mathbf{v}^*\mathbf{Gv}, \tag{15}$$

$$\mathbf{u}^*\mathbf{u} = 1 \text{ и } \mathbf{v}^*\mathbf{v} = 1. \tag{16}$$

Введем систему векторов

$$\mathbf{x} = (\mathbf{v}+\mathbf{u})/\sqrt{2} \text{ и } \mathbf{y} = (\mathbf{v}-\mathbf{u})/\sqrt{2}. \tag{17}$$

Система векторов (17) будет ортонормированна. Для матрицы **G** можно записать уравнение

$$\left|\mathbf{x}^*\mathbf{G}\mathbf{y}\right|^2 = q^2(\mathbf{x}^*\mathbf{G}\mathbf{x})(\mathbf{y}^*\mathbf{G}\mathbf{y}), \tag{18}$$

где

$$q = \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{\lambda_2^2 + \lambda_1^2}. \tag{19}$$

Параметр q характеризует величину степени поляризационной анизотропности флуктуирующего объекта.

Эрмитова матрица **G** называется матрицей Грейвса. Если воспользоваться соотношением (11), то искомое отношение (радиолокационный контраст) будет иметь вид

$$p = \frac{\mathbf{E}_{\text{п}}^*\mathbf{G}_1\mathbf{E}_{\text{п}}}{\mathbf{E}_{\text{п}}^*\mathbf{G}_2\mathbf{E}_{\text{п}}}, \tag{20}$$

где $\mathbf{G}_1$ и $\mathbf{G}_2$ – матрицы Грейвса соответственно первого и второго объектов. Выражение (20) можно представить через матрицы рассеяния этих объектов

$$p = \frac{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*(\mathbf{S}_2^{-1})^*\mathbf{G}_1\mathbf{S}_2^{-1}\mathbf{E}_{2\text{o}}}{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*\mathbf{E}_{2\text{o}}} = \frac{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*(\mathbf{S}_2^{-1})^*\mathbf{S}_1^*\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1}\mathbf{E}_{2\text{o}}}{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*\mathbf{E}_{2\text{o}}}, \tag{21}$$

где $\mathbf{E}_{\text{п}} = \mathbf{S}_2^{-1}\mathbf{E}_{2\text{o}}$.

Числитель правой части уравнения (21) представляет собой квадратичную форму. Его величина изменяется между минимальным и максимальным собственными значениями эрмитовой матрицы $(\mathbf{S}_2^{-1})^*\mathbf{S}_1^*\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1}$. Запишем выражение (21) в виде

$$p = \frac{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*(\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1})^*\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1}\mathbf{E}_{2\text{o}}}{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*\mathbf{E}_{2\text{o}}} = \frac{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*\mathbf{W}\mathbf{E}_{2\text{o}}}{\mathbf{E}_{2\text{o}}^*\mathbf{E}_{2\text{o}}}, \tag{22}$$

где $\mathbf{W} = (\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1})^*\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2^{-1}$.

Таким образом, задача нахождения отношения (21) сводится к задаче нахождения собственных значений матрицы **W** [7, 8]. Собственные значения матрицы **W** являются корнями характеристического многочлена

$$p_{2,1} = \frac{1}{2}\left(\mathrm{w}_{11} + \mathrm{w}_{22} \pm \sqrt{\left(\mathrm{w}_{11} - \mathrm{w}_{22}\right)^2 + 4\left|\mathrm{w}_{12}\right|^2}\right). \tag{23}$$

Пусть $p_1 \le p_2$. Из выражения (23) следует, что равенство собственных значений $p_1 = p_2$ возможно лишь при условии $\mathrm{w}_{11} = \mathrm{w}_{22}$ и $\left|\mathrm{w}_{12}\right| = 0$. Собственным значениям матрицы **W** соответствуют собственные векторы $\mathbf{z}_1$ и $\mathbf{z}_2$, которые должны удовлетворять соотношениям

$$p_1 = \frac{\mathbf{z}_1^*\mathbf{W}\mathbf{z}_1}{\mathbf{z}_1^*\mathbf{z}_1},\ p_2 = \frac{\mathbf{z}_2^*\mathbf{W}\mathbf{z}_2}{\mathbf{z}_2^*\mathbf{z}_2}. \tag{24}$$

Следовательно, если вектор падающей электромагнитной волны будет отличаться только скалярным множителем от собственного вектора $\mathbf{z}_2$ матрицы $\mathbf{W}$, то величина радиолокационного контраста достигнет своего максимального значения равного p_2. При пропорциональности вектора падающей волны собственному вектору $\mathbf{z}_1$ величина радиолокационного контраста достигает своего минимального значения равного p_1 [4, 5].

При переходе к новому поляризационному базису матрица Грейвса подвергается преобразованию подобия с помощью той же унитарной матрицы, что и матрица рассеяния

$$\mathbf{G} = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{G}_{\text{c}}\mathbf{Q}^{\text{T}}, \tag{25}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{Q}\mathbf{S}_{\text{c}}\mathbf{Q}^{\text{T}}. \tag{26}$$

Следовательно, если какая-то унитарная матрица $\mathbf{Q}$ приводит матрицу $\mathbf{S}$ к диагональному виду, то эта же матрица $\mathbf{Q}$ диагонализирует и матрицу $\mathbf{G}$.

Рассмотрим теперь задачу, когда матрицы рассеяния $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$ двух объектов с помощью матрицы $\mathbf{Q}$ одновременно приводятся к диагональному виду посредством преобразования конгруэнтности (26). Тогда обе матрицы рассеяния $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$ можно представить в диагональном виде

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{Q}\boldsymbol{\Lambda}_1\mathbf{Q}^{\text{T}},\ \ \mathbf{S}_2 = \mathbf{Q}\boldsymbol{\Lambda}_2\mathbf{Q}^{\text{T}}, \tag{27}$$

где $\boldsymbol{\Lambda}_i = \text{diag}(\lambda_{i1}, \lambda_{i2})$.

Таким образом, матрица

$$\mathbf{S}_1\overline{\mathbf{S}}_2 = \mathbf{Q}\boldsymbol{\Lambda}_1\mathbf{Q}^{\text{T}}\overline{\mathbf{Q}\boldsymbol{\Lambda}}_2\mathbf{Q}^{*} = \mathbf{Q}\boldsymbol{\Lambda}_1\overline{\boldsymbol{\Lambda}}_2\mathbf{Q}^{*} \tag{28}$$

унитарно диагонализуема и, следовательно, нормальна [7]. Поэтому необходимым и достаточным условием существования унитарной матрицы $\mathbf{Q}$ такой, что обе матрицы рассеяния объектов $\mathbf{Q}\mathbf{S}_1\mathbf{Q}^{\text{T}}$ и $\mathbf{Q}\mathbf{S}_2\mathbf{Q}^{\text{T}}$ диагональные, является нормальность матрицы $\mathbf{S}_1\overline{\mathbf{S}}_2$, т. е. выполнение равенства

$$\mathbf{S}_1\overline{\mathbf{S}}_2\mathbf{S}_2\overline{\mathbf{S}}_1 = \mathbf{S}_2\overline{\mathbf{S}}_1\mathbf{S}_1\overline{\mathbf{S}}_2\,. \tag{29}$$

Соотношение (29) одновременно определяет условия, при которых матрицы Грейвса двух рассеивающих объектов приводятся к диагональному виду с помощью конгруэнтного преобразования (25).

Действительно, пусть обе матрицы Грейвса представлены в диагональном виде

$$\mathbf{G}_1 = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_1\mathbf{Q}^{\text{T}} \text{ и } \mathbf{G}_2 = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_2\mathbf{Q}^{\text{T}}, \tag{30}$$

тогда

$$\mathbf{G}_1\mathbf{G}_2 = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_1\mathbf{Q}^{\text{T}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_2\mathbf{Q}^{\text{T}} = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\mathbf{Q}^{\text{T}}. \tag{31}$$

Используя соотношения (30), выражение (31) можно представить в виде

$$\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\mathbf{Q}^{\text{T}} = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_2\mathbf{M}_1\mathbf{Q}^{\text{T}} = \overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_2\mathbf{Q}^{\text{T}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{M}_1\mathbf{Q}^{\text{T}} = \mathbf{G}_2\mathbf{G}_1. \tag{32}$$

Сравнивая соотношения (30) и (32), можно сделать вывод, что условием существования унитарной матрицы **Q**, осуществляющей одновременную диагонализацию матриц $\mathbf{G}_1$ и $\mathbf{G}_2$, является эрмитовость матрицы $\mathbf{G}_1\mathbf{G}_2$ [6, 17]. Что эквивалентно равенству

$$\mathbf{G}_1\mathbf{G}_2 = \mathbf{G}_2\mathbf{G}_1. \tag{33}$$

Равенство (33) в свою очередь эквивалентно равенству (29).

Следовательно, необходимым и достаточным условием существования поляризационного базиса, в котором матрицы рассеяния двух объектов будут одновременно иметь диагональный вид, является выполнение условия (29).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получено строгое решение задачи об изменении радиолокационного контраста двух целей с произвольными матрицами рассеяния в зависимости от вида поляризации, облучающей эти цели электромагнитной волны. Установлена строгая аналитическая связь между максимальным и минимальным значениями радиолокационного контраста и видом поляризации, на котором это реализуется. Полученные результаты представляют существенный интерес для ряда узловых задач радиолокации [10–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов А.И. Радиолокационный контраст двух объектов // Изв. вузов. Сер. «Радиоэлектроника». 1979. Т. 22, № 7. С. 24–28.

2. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 644 с.

3. Маслов В.Ю. Радиополяриметрический контраст при отражении от двух рассеивателей // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 132–134.

4. Маслов В.Ю. Разрешение по дальности двух точечных объектов с использованием ортогонально поляризованных электромагнитных волн // Научный Вестник МГТУ ГА. 2006. № 107. С. 55–59.

5. Маслов В.Ю. Пеленгование протяженных объектов с использованием ортогонально поляризованных электромагнитных волн // Научный Вестник МГТУ ГА. 2006. № 107. С. 68–72.

6. Маслов В.Ю. Дифференциальная радиополяриметрия при отражении электромагнитных волн от двух объектов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2005. № 93. С. 116–119.

7. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дифференциальные свойства матрицы рассеяния // Научный Вестник МГТУ ГА. 2004. № 79. С. 43–46.

8. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 655 с.

9. Справочник по радиолокации. В 2-х кн. / под ред. М. Сколник. М.: Техносфера, 2014. 384 с.

10. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. М.: Радиотехника, 2015. 304 с.

11. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. М.: ИПРЖР, 2002. 88 с.

12. Лавров А.А. Радиолокационный скоростной портрет цели. Основы теории. М.: Радиотехника, 2013. 164 с.

13. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007. 242 с.

14. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

15. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / под ред. Я.Д. Ширман. М.: Радиотехника, 2007. 515 с.

16. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 158 с.

17. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.

18. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

19. Звежинский С.С., Иванов В.А. Классификации и информационно-измерительные модели средств обнаружения // Специальная техника. 2007. № 6. С. 32–37.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта Московского государственного технического университета гражданской авиации, vilandes@yandex.ru.

Маслов Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор Московского технологического университета, vilandes@yandex.ru.

RADAR LOCATION CONTRAST IN THE REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC WAVE FROM TWO OBJECTS

Anatoliy I. Kozlov[1], Viktor Yu. Maslov[2]
[1]*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*
[2]*Moscow Technological University, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The paper considers the problem of finding the power flux density of signals reflected from two objects with different symmetric scattering matrices when they are irradiated with a completely polarized wave. The authors consider the case when the eigenvalues of the matrix are different given the form of the unitary diagonalization of the matrix for this case. The relation defining the diagonal elements of the factor is given. A comparison is made between the power flux density of the signals reflected from two objects with different scattering matrices when they are irradiated with a completely polarized wave. The power flux density of the electromagnetic wave reflected by this object is determined mathematically. Based on the definition of the scattering matrix, a transition to incident waves is performed. A parameter characterizing the degree of polarization anisotropy of the fluctuating object is given. The ratio for radar contrast is given. It is concluded that if the vector of the incident electromagnetic wave differs only in the scalar multiplier from the eigenvector of the matrix, the radar contrast will reach its maximum value. When the vector of the incident wave is proportional to the eigenvector, the value of the radar contrast reaches its minimum value. A problem is considered when the scattering matrices of two objects are simultaneously reduced to a diagonal form by means of a congruence transformation. Conditions are determined under which the Graves matrix of two scattering objects is reduced to diagonal form by means of a congruent transformation. A necessary and sufficient condition for the existence of a polarization basis is obtained in which the scattering matrices of two objects will simultaneously have a diagonal form.

Key words: a frequency synthesizer, a divisor with a fractional-variable division coefficient, a sigma-delta modulator.

REFERENCE

1. Kozlov A.I. *Radiolokatsionnij contrast dvuch objectov* [The radar contrast between two objects]. *Izvesija vuzov. Ser. "Radioelectronica",* 1979, vol. 22, no. 7, pp. 24–28. (in Russian)

2. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. *Polyarizaciya radiovoln. Kn. 2. Radiolokacionnaya polyarimetriya* [Polarization of radio waves. Book 2. Radar polarimetry]. M.: Radio engineering, 2007, 644 p. (in Russian)

3. Maslov V.Yu. *Radiopolyarimetricheskij kontrast pri otrazhenii ot dvux rasseivatelej* [Radiopolarimetric contrast in reflection from two scatterers]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2012, no. 179, pp. 132–134. (in Russian)

4. Maslov V.Yu. *Razreshenie po dalnosti dvux tochechnyx obektov s ispolzovaniem ortogonalno polyarizovannyx elektromagnitnyx voln* [Resolution on the range of two point objects using orthogonally polarized electromagnetic waves]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2006, no. 107, pp. 55–59. (in Russian)

5. Maslov V.Yu. *Pelengovanie protyazhennyx obektov s ispolzovaniem ortogonalno polyarizovannyx elektromagnitnyx voln* [Direction finding of extended objects using orthogonally polarized electromagnetic waves]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2006, No. 107, pp. 68–72. (in Russian)

6. Maslov V.Yu. *Differencialnaya radiopolyarimetriya pri otrazhenii elektromagnitnyx voln ot dvux obektov* [Differential radiopolarimetry in the reflection of electromagnetic waves from two objects]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2005, no. 93, pp. 116–119. (in Russian)

7. Kozlov A.I., Maslov V.Yu. *Differencialnye svojstva matricy rasseyaniya* [Differential erential properties of the scattering matrix]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2004, no. 79, pp. 43–46. (in Russian)

8. Horn R., Johnson C. *Matrichnyj analiz* [Matrix analysis]. M.: Mir, 1989, 655 p. (in Russian)

9. Skolnik M. *Spravochnic po radiolorfcii* [Handbook of radar]. M.: Technosphere, 2014, 384 p. (in Russian)

10. Verba V.S. *Aviacionnije kompleksi radiolokacionnogo dozora i navedenija* [Aircraft radar patrol and guidance]. M., 2015, 304 p. (in Russian)

11. Kanashenkov A.I., Merkulov V.I., Samarin O.F. *Oblik perspectivnich bortovich radar* [Look promising airborne radar systems. Possibilities and limitations]. M.: IPRCzR, 2002, 88 p. (in Russian)

12. Lavrov A.A. *Radiolokacionnij skorostnoj portret celi. Osnovi teorii* [Radar speed portrait purpose. Fundamentals of the theory]. M.: Radiotechnika, 2013, 164 p. (in Russian)

13. Dudnic P.I., Ilchuk P.I., Tatarskij B.G. *Mnogofunkcional'nye radiolokacionnye sistemy* [Multifunction radar system]. M.: Drofa, 2007, 242 p. (in Russian)

14. Kondratenkov G.S., Frolov A.Ju. *Radiolokacionnie sistemi distancionnogo zondirovanija Zemli* [Radiovidenie. Radar systems remote sensing]. M.: Radiotechnika, 2005, 368 p. (in Russian)

15. Shirman J.D. *Radioelektronnie sistemi. Osnovi postroenija i teorija. Spravochnic* [Electronic systems. Bases of construction and theory. Reference]. M.: Radiotechnika, 2007, 515 p. (in Russian)

16. Biard R.U., Mak Lein T.U. *Malie bespilotnie letatelnie apparati* [Small unmanned aircraft: theory and practice]. M.: Technosphere, 2015, 158 p. (in Russian)

17. Ostrovitjanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaja teorija radiolokacii pronjaczennich celej* [Statistical theory of extended radar purposes]. M.: Radio i svjaz, 1982, 232 p. (in Russian)

18. Korennoj A.V. *Obnaruszenie, raspoznavanie I opredelenie obrazov objectov* [Detection, recognition and identification of parameters of images of objects]. M.: Radiotechnica, 2012, 112 p. (in Russian)

19. Zvezhinskij S.S., Ivanov V.A. *Klassifikacija i informscionno-izmeritelnie modeli sredstv obnaruszenija* [Classification and information-measuring models of detection]. M.: Specialnaja technical, 2007, no. 6, pp. 32–37. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy I. Kozlov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment for Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vilandes@yandex.ru.

Viktor Yu. Maslov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow Technological University, vilandes@yandex.ru.

Поступила в редакцию	12.09.2017	Received	12.09.2017
Принята в печать	14.03.2018	Accepted for publication	14.03.2018