## УДК 629.7.052

В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков

# Использование ортогонально эллиптически поляризованных сигналов в бортовых СВЧ двухканальных радиомаячных системах навигации

Исследуется возможность определения пеленга и угла крена подвижного объекта по ортогонально эллиптически поляризованным сигналам радиомаяка, излучаемым одновременно из двух пространственно разнесенных точек с известными координатами. Пеленг и крен определяются на борту подвижного объекта СВЧ двухканальной приемной системой на основе амплитудно-фазовой обработки результирующих векторных сигналов, принятых в линейном поляризационном базисе.

Ключевые слова: радиомаяк, ортогонально эллиптически поляризованные сигналы, амплитудно-фазовая обработка, линейный поляризационный базис, пеленг, крен, подвижный объект.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-2-7-11

Используемые на практике радиомаячные системы навигации (РМС) для получения информации о пеленге подвижного объекта (ПО) традиционно используют амплитудные, частотные или временные характеристики принимаемых на борту ПО сигналов радиомаяка [1-3], а для измерения крена используются дорогостоящие автономные инерциальные средства навигации [4-6]. Поляризационные же характеристики сигналов радиомаяка как «носителя» навигационной информации практически не используются [7-9]. В работах [10-13] для оценки пеленга и крена ПО исследовались частные случаи использования ортогонально-линейных [10, 11] или ортогонально круговых [12, 13] сигналов радиомаяка. Пеленг и крен ПО оценивались на выходе СВЧ двухканальной приемной системы по результатам амплитудно-фазовой обработки результирующих векторных сигналов, принятых в линейном [10] или круговом [11, 13] поляризационных базисах. Выбор поляризационных базисов, в которых представляются излучаемые и принимаемые на борту ПО результирующие векторные сигналы, определяется физическим смыслом решаемой технической задачи.

#### Постановка задачи

Цель данной работы — исследовать наиболее общий случай использования ортогонально эллиптически поляризованных сигналов радиомаяка для оценки пеленга и угла крена ПО.

# Поляризационный метод определения пеленга и угла крена ПО

Предположим, что радиомаяк одновременно излучает из двух пространственно разнесенных в горизонтальной плоскости на расстоянии *d* точек ортогонально эллиптические поляризованные электромагнитные волны с равными амплитудами, начальными фазами, длинами волн и равными углами эллиптичности. Используем представление плоской однородной эллиптически поляризованной электромагнитной волны вектором Джонса [14, 15]. Тогда результирующая волна на направлении α может быть представлена в линейном поляризационном базисе (ЛПБ) в векторной форме (опуская временную зависимость) в виде

$$\mathbf{E}_{\mathbf{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{bmatrix} \cos\varepsilon \\ j\sin\varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\sin\varepsilon \\ \cos\varepsilon \end{bmatrix} \cdot e^{j\Delta\phi} \right\}, \tag{1}$$

где  $\Delta \phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha$  – разность фаз между ортого-

нально эллиптически поляризованными волнами в точке приема на ПО; λ – длина волны; ε – угол эллиптичности излучаемых ортогонально поляризованных электромагнитных волн.

Из (1) следует, что пеленг  $\alpha$ , определяемый как угол между перпендикуляром к середине базы d и направлением на ПО, может быть найден как

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda}{2\pi d} \cdot (\Delta \varphi) \,. \tag{2}$$

Наличие множителя  $1/\sqrt{2}$  в выражении (1) объясняется принятой для удобства единичной интенсивностью результирующей волны  $E_p$ .

Предположим, что ПО имеет в общем случае крен  $\gamma$ , определяемый как угол между правой поперечной осью ПО и горизонтальной плоскостью [1]. Предположим также, что прием результирующей волны (1) на борту ПО осуществляется приемной антенной в ЛПБ и в её СВЧ-тракт установлен линейный поляризационный разделитель (ЛПР), орты собственной системы координат которого совпадают с вертикальной и поперечной строительными осями ПО. Выбранная ориентация ортов ЛПР позволяет в ЛПБ разделить принятую результирующую волну (1) на две ортогонально линейно поляризованные составляющие  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  ориентированные вдоль поперечной и вертикальной строительными осями ПО соответственно.

Установим связь амплитуд  $A_1$  и  $A_2$ , а также фаз  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  составляющих  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  на выходах ЛПР с пеленгом  $\alpha$  и углом крена  $\gamma$  ПО. Для описания взаимодействия результирующей волны (1) с элементами СВЧ-тракта приемной антенны воспользуемся известным формализмом векторов и матриц Джонса [14]. Тогда составляющие  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  на выходах ЛПР (опуская временную зависимость) в ЛПБ в векторной форме можно найти с помощью преобразований вида

$$\mathbf{E}_{1} = [\Pi_{1}] [R(\pm \gamma)] \mathbf{E}_{p}; \qquad (3)$$

$$\mathbf{E}_{2} = \left[\Pi_{2}\right] \left[ R(\pm \gamma) \right] \mathbf{E}_{p} , \qquad (4)$$

где  $\begin{bmatrix} R(\pm\gamma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \mp\sin\gamma \\ \pm\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$  – оператор поворота на угол крена  $\pm\gamma$ ;  $+\gamma$  – правая поперечная ось ПО ниже горизонтальной плоскости;  $-\gamma$  – правая поперечная ось ПО выше горизонтальной плоскости;  $[\Pi_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  – оператор Джонса первого плеча ЛПР (переход с круглого волновода на прямоугольный с горизонтальной собственной поляризацией, совпадающей с правой поперечной осью ПО), записанный в собственной системе координат;  $[\Pi_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  –

оператор Джонса второго плеча ЛПР (переход с круглого волновода на прямоугольный с вертикальной собственной поляризацией, совпадающей с вертикальной осью ПО), записанный в собственной системе координат.

Проделав в (3) и (4) необходимые вычисления, получим векторы Джонса  $E_1$  и  $E_2$  на выходах ЛПР для углов крена  $\pm \gamma$  в виде

$$\mathbf{E}_{1}(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{bmatrix} A(\pm\gamma) + jB(\pm\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} \right\}; \tag{5}$$

$$\mathbf{E}_{2}(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{bmatrix} 0\\ C(\pm\gamma) + jD(\pm\gamma) \end{bmatrix} \right\}, \tag{6}$$

где

 $A(\pm\gamma) = \cos\gamma\cos\varepsilon - \sin\varepsilon\cos\gamma\sin\Delta\phi\mp$ 

$$\mp \sin \gamma \cos \varepsilon \cos \Delta \varphi; \tag{7}$$

 $B(\pm\gamma) = \sin\varepsilon\cos\gamma\cos\Delta\phi\mp\sin\gamma\sin\varepsilon\mp$ 

$$=\sin\gamma\cos\varepsilon\sin\Delta\varphi;$$
 (8)

 $C(\pm\gamma) = \pm \sin\gamma \cos\varepsilon + \cos\gamma \csc\cos\Delta\phi \mp$ 

$$-\sin\varepsilon\sin\gamma\sin\Delta\varphi; \qquad (9)$$

 $D(\pm\gamma) = \cos\gamma\sin\varepsilon \pm \sin\varepsilon\sin\gamma\cos\Delta\phi +$ 

$$+\cos\gamma\cos\varepsilon\sin\Delta\phi.$$
 (10)

С учетом (5)–(10) сигналы на входах двухканального приемника будут иметь вид

$$\dot{E}_1(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ A(\pm\gamma) + jB(\pm\gamma) \right\}; \qquad (11)$$

$$\dot{E}_2(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ C(\pm\gamma) + jD(\pm\gamma) \}.$$
(12)

Комплексные элементы (11) и (12) представляют собой проекции в общем случае эллиптически поляризованной результирующей волны (1) на орты ЛПБ.

Найдем амплитуды  $A_1$ ,  $A_2$  и фазы  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ сигналов (11) и (12) на выходах двухканального приемника, имеющего, например, линейную амплитудную характеристику и линейный детектор, и установим их связь с навигационными элементами  $\alpha$  и  $\gamma$ :

$$A_{\rm I}(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 \mp \sin 2\gamma \cos \Delta \phi - \sin 2\varepsilon \cos 2\gamma \sin \Delta \phi} ; \quad (13)$$

$$\Psi_1(\pm\gamma) = \operatorname{arctg} \frac{B(\pm\gamma)}{A(\pm\gamma)}; \qquad (14)$$

$$A_2(\pm\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 \pm \sin 2\gamma \cos \Delta \phi} + \sin 2\varepsilon \cos 2\gamma \sin \Delta \phi ; \quad (15)$$

$$\Psi_2(\pm\gamma) = \operatorname{arctg} \frac{D(\pm\gamma)}{C(\pm\gamma)}.$$
 (16)

Найдем отношение амплитуд  $A_2/A_1$  и разность фаз  $\Delta \Psi(\pm \gamma) = \Psi_2(\pm \gamma) - \Psi_1(\pm \gamma)$  сигналов (11) и (12) на выходе приемника для углов крена  $\pm \gamma$ :

$$\frac{A_2}{A_1}(\pm\gamma) = \frac{\sqrt{1\pm\sin 2\gamma\cos\Delta\phi + \sin 2\varepsilon\cos 2\gamma\sin\Delta\phi}}{\sqrt{1\mp\sin 2\gamma\cos\Delta\phi - \sin 2\varepsilon\cos 2\gamma\sin\Delta\phi}}$$
(17)

$$\Delta \Psi(\pm \gamma) = \operatorname{arctg} \frac{D(\pm \gamma)}{C(\pm \gamma)} - \operatorname{arctg} \frac{B(\pm \gamma)}{A(\pm \gamma)} \pm n\pi , \quad (18)$$

где *n* = 0, 1, 2, ....

В (14), (16) и (18) обозначения *А*, *B*, *C* и *D* определяются соответственно выражениями (7)–(10).

# Обсуждение результатов исследования

Из анализа (17) и (18) следует, что в общем случае, отношение амплитуд  $A_1/A_2$  и разность фаз  $\Delta \Psi$  составляющих  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  зависят как от угла эллиптичности є излучаемых электромагнитных волн, так и от навигационных элементов  $\alpha$  и  $\gamma$  ПО.

В частных случаях, если, например, радиомаяк излучает ортогонально линейно поляризованные волны, тогда, подставляя  $\varepsilon = 0^{\circ}$  в (17) и (18), с учетом (7)–(10) получим

$$\frac{A_2}{A_1}(\pm\gamma) = \frac{\sqrt{1\pm\sin 2\gamma\cos\Delta\phi}}{\sqrt{1\mp\sin 2\gamma\cos\Delta\phi}}$$
(19)

И

$$\Delta \Psi(\pm \gamma) = \pm \arctan\left\{\frac{1}{\cos 2\gamma} \operatorname{tg} \Delta \varphi\right\} \pm n\pi .$$
 (20)

Из (19), (20) следует, что для однозначной оценки  $\alpha$ или  $\gamma$  требуется априорная информация об одном из них, что полностью согласуется с результатами частных исследований, полученных в [10].

Доклады ТУСУРа, 2018, том 21, № 2

В другом частном случае, если радиомаяк излучает ортогонально поляризованные по кругу электромагнитные волны, то, подставляя  $\varepsilon = \frac{\pi}{4}$  в (17) и

# (18), с учетом (7)-(10) получим

$$\frac{A_2}{A_1}(\pm\gamma) = \frac{\sqrt{1 + \sin(\Delta\phi \pm 2\gamma)}}{\sqrt{1 - \sin(\Delta\phi \pm 2\gamma)}}$$
(21)

И

$$\Delta \Psi(\pm \gamma) = 0^{\circ} . \tag{22}$$

Преобразуя (21), получим

$$\frac{A_2}{A_1}(\pm\gamma) = \left| \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta\phi}{2} \pm \gamma\right) \right|.$$
 (23)

Из анализа (22) и (23) следует, что информация о пеленге  $\alpha$  и угле крена  $\gamma$  содержится в амплитудных соотношениях синфазных ортогонально линейно поляризованных составляющих  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  на выходах ЛПР и для однозначной их оценки также требуется априорная информация об одном из них.

Предположим, что приемная бортовая антенна и её СВЧ-элементы располагаются на гиростабилизированной платформе [4, 5]. Тогда подставляя в (23)  $\gamma = 0^{\circ}$ , получим

$$\Delta \varphi = \pm \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arcctg} \frac{A_2}{A_1}\right) \pm n\pi .$$
 (24)

Подставляя (24) в (2), получим выражение для расчета пеленга а ПО в виде

$$\alpha = \pm \arcsin\left[\frac{\lambda}{\pi d} \left(\frac{\pi}{4} - \operatorname{arcctg} \frac{A_2}{A_1}\right)\right] \pm n\pi \,.$$
 (25)

Из (25) следует, что если отношение амплитуд  $A_2/A_1 = 1$ , то  $\alpha = 0^\circ$ , если  $A_2/A_1 < 1$ , то  $\alpha < 0^\circ$ , и если  $A_2/A_1 > 1$ , то  $\alpha > 0^\circ$ .

В другом случае, если, например, ПО двигается вдоль равносигнального направления, совпадающего с перпендикуляром к середине баз d, образованной источниками излучения ортогонально поляризованных по кругу электромагнитных волн, тогда, подставляя в (23)  $\Delta \phi = 0^\circ$ , получим

$$\frac{A_2}{A_1}(\pm\gamma) = \left| \operatorname{ctg}(45\pm\gamma) \right|. \tag{26}$$

Откуда следует, что крен ү ПО будет равен

$$\gamma[\text{pag}] = \pm \left(\frac{\pi}{4} - \operatorname{arcctg} \frac{A_2}{A_1}\right).$$
 (27)

Из (27) следует, что если отношение амплитуд  $A_2/A_1 = 1$ , то  $\gamma = 0^\circ$ , если  $A_2/A_1 < 1$ , то  $\gamma < 0^\circ$ , и если  $A_2/A_1 < 1$ , то  $\gamma < 0^\circ$ , и если  $A_2/A_1 > 1$ , то  $\gamma > 0^\circ$ .

#### Заключение

По результатам исследований можно сформулировать следующие выводы: 1. Если радиомаяк излучает ортогонально эллиптически поляризованные сигналы и прием результирующих векторных сигналов на борту осуществляется в ЛПБ, то одновременно и независимо оценить пеленг и крен ПО не представляется возможным.

2. Практическое использование ортогонально эллиптически поляризованных сигналов радиомаяка в анализируемой навигационной задаче не целесообразно, так как требуется априорная информация об одном из рассматриваемых навигационных элементов.

Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию Минобрнауки № 8.7348.2017/8.9.

#### Литература

1. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. – М.: Радио и связь, 1985. – 344 с.

2. Сосновский А.А. Авиационная радионавигация: справочник / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович, Э.А. Лутин, И.Б. Максимов. – М.: Транспорт, 1990. – 264 с.

3. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

4. Пельпор Д.С. Гироскопические системы ориентации и стабилизации. – М.: Машиностроение, 1982. – 165 с.

5. Смирнов Е.Л. Гироскопические навигационные системы. – СПб.: Эльмор, 2004. – 400 с.

 Алешин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К. и др. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.

7. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.

8. Богородский В.В. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов / В.В. Богородский, Д.Б. Канарейкин, А.И. Козлов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 279 с.

9. Козлов А.И. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2005. – 704 с.

10. Гулько В.Л. Использование ортогонально линейно поляризованных сигналов в бортовых СВЧ двухканальных радиомаячных системах навигации / В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 14–17.

11. Гулько В.Л. Поляризационный метод определения пеленга и угла крена подвижного объекта в двухканальных радиомаячных системах навигации / В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 44–49.

12. Гулько В.Л. Использование ортогонально поляризационных по кругу сигналов радиомаяка для определения пеленга подвижного объекта бортовой СВЧ двухканальной приемной системой / В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков // Сб. тр. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2017. – Т. 3. – С. 822–826.

13. Гулько В.Л. Поляризационно-фазовый метод определения пеленга и угла крена подвижного объекта по ортогонально поляризованным по кругу сигналам радиомаяка / В.Л. Гулько, А.А.Мещеряков // Сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2018. – Т. 3. - С. 251–255.

14. Аззам Р.М.А. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р.М.А. Аззам, Н. Башара. – М.: Мир, 1981. – 583 с.

15. Татаринов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов / В.Н. Татаринов, С.В. Татаринов, Л.П. Лигтхарт. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 379 с.

#### Гулько Владимир Леонидович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7 (383-2) 41-34-55 Эл. почта: gulkovl@sibmail.com

## Мещеряков Александр Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. РТС ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 ORCID 0000-0001-9566-7905 Тел.: +7 (383-2) 41-34-55 Эл. почта: msch@rts.tusur.ru

#### Gulko V.L., Mescheryakov A.A. Use of orthogonal linearly polarized signals on board dual-channel UHF radio beacon navigation systems

The possibility of using orthogonally elliptically polarized signals of the beacon having two spaced radiation points for determining bearing and roll angle of a mobile object is examined.

The bearing and roll angle can be identified by results of analysis of amplitudes and phases in the linear polarization basis of simultaneously received vector signals by aboard mobile unit with UWF two-channel receiver.

Keywords: beacon, movable object, orthogonally elliptically polarized signals, Jones vector, amplitude-phase processing, bearing, roll angle, linear polarization basis.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-2-7-11

#### References

1. Yarlykov M.S. Statisticheskaya teoriya radionavigacii [Statistical theory of radio navigation]. Moskow, Radio I svyaz', 1985. 344 p.

2. Sosnovskij A.A., Hajmovich I.A., Lutin EH.A., Maksimov I.B. Aviacionnaya radionavigaciya: spravochnik [Aviation radionavigation: Reference book.]. Moskow, Transport, 1990. 264 p.

3. Shirman Ya.D., Bagdasaryan S.T., Malyarenko A.S. i dr. Radioehlektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya: spravochnik [Radioelectronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory: Reference Book.]. Moskow, Radiotekhnika, 2007. 512 p.

4. Pel'por D.S. Giroskopicheskie sistemv orientacii i stabilizacii [Gyroscopic systems of orientation and stabilization]. Moskow, Mashinostroenie, 1982. 165 p.

5. Smirnov E.L. Giroskopicheskie navigacionnye sistemy [Gyroscopic Navigation Systems]. Sankt-Peterburg, Ehl'mor, 2004. 400 p.

6. Aleshin B.S., Afonin A.A., Veremeenko K.K., Koshelev B.V. i dr. Orientaciya i navigaciya podvizhnyh ob"ektov: sovremennve informacionnve tekhnologii [Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies]. Pod red. B.S. Alyoshina, K.K. Veremeenko, A.I. Chernomorskogo. Moskow, Fizmatlit, 2006. 424 p.

7. Gusev K.G., Filatov A.D., Sopolev A.P. Polyarizacionnaya modulyaciya [Polarization modulation]. Moskow, Sov. radio, 1974. 288 p.

8. Bogorodskij V.V., Kanarejkin D.B., Kozlov A.I.. Polvarizaciva rassevannogo i sobstvennogo radioizlucheniva zemnyh pokrovov [Polarization of scattered and intrinsic radio emission of terrestrial coverings]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 279 p.

9. Kozlov A.I., Logvin A.I., Sarychev V.A. Polyarizaciya radiovoln. Polyarizacionnaya struktura radiolokacionnvh signalov [Polarization of radio waves. Polarization structure of radar signals]. Moskwa: Radiotekhnika, 2005, 704 p.

10. Gulko V.L., Mescheryakov A.A. Use of orthogonal linearly polarized signals in a dual channel board UHF radio beacon landing navigation systems. Proceedings of TUSUR University, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 14-17 (In Russ.).

11. Gulko V.L., Mescheryakov A.A. Polarization Method of Determining the Bearing and the Roll Angle of a Mobile Object with Two channel Radio Beacon Navigation Systems. Izv. Vuzov «Fizika», 2017, vol. 60, no. 6, pp. 44-49 (In Russ.).

12. Gulko V.L., Mescheryakov A.A. Ispol'zovanie ortogonal'no polyarizovannyh po krugu signalov radiomayaka dlya opredeleniya pelenga podvizhnogo ob"ekta bortovoj SVCH dvuhkanal'noj priemnoj sistemoj [The use of orthogonal circularly polarized beacon signals to determine the bearing of the mobile unit board UHF dual-channel receiver system]. Sbornik trudov XXIII Mezhdunarodnoj nauchnotekhnicheskoj konferencii «Radiolokaciya, navigaciya, svyaz'» [Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, navigation, communication»]. Voronezh, 2017, vol. 3, pp. 822-826.

13. Gulko V.L., Mescheryakov A.A. Polyarizacionnofazovyj metod opredeleniva pelenga i ugla krena podvizhnogo ob"ekta po ortogonal'no polyarizovannym po krugu signalam radiomavaka [Polarization-phase method for determining bearing and roll angle of a mobile object along orthogonally circularly polarized beacon signals] Sbornik trudov XXIV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Radiolokaciya, navigaciya, svyaz'» [Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference «Radiolocation, navigation, communication»]. Voronezh, 2018, vol. 3, pp. 251-255.

14. Azzam P.M.A., Bashara H. Ellipsometriya i polyarizovannyj svet [Ellipsometry and Polarized Light]. Moskow, MIR, 1981. 583 p.

15. Tatarinov V.N., Tatarinov S.V., Ligtkhart L.P. Vvedenie v sovremennuyu teoriyu polyarizacii radiolokatsionnykh signalov. [Introduction to the modern theory of polarization of radar signals]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 2006. 379 p.

## Vladimir L. Gulko

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050 Phone: +7 (382-2) 41-34-55 Email: gulkovl@sibmail.com

## Alexander A. Mescheryakov

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenina prosp., Tomsk, Russia, 634050 ORCID 0000-0001-9566-7905 Phone: +7 (382-2) 41-34-55 Email: msch@rts.tusur.ru