

УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов, В.П. Денисов

Вычисление топоцентрических координат источника радиоизлучения по результатам измерений фазового пеленгатора на борту подвижного объекта

Предложен алгоритм вычисления азимута и угла места на источник радиоизлучения в топоцентрической системе координат по результатам измерений фазовым пеленгатором, расположенным на борту подвижного объекта. Положение антенной системы пеленгатора относительно земной топоцентрической системы координат может изменяться. Изменение положения антенной системы влияет на точность вычисления пеленгов. Рассмотрен способ уменьшения ошибок пеленгования методом итераций. Проведена проверка алгоритма методом математического моделирования.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, антенная решетка, вычисление пеленга, оценка ошибок пеленгования.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-7-15

В статье рассматриваются двухкоординатные фазовые радиопеленгаторы, т.е. устройства, определяющие угловые координаты источника радиоизлучения в трехмерном пространстве.

Двухкоординатные фазовые радиопеленгаторы находят применение в радиолокации [1], радионавигации [2, 3], системах посадки летательных аппаратов [4, 5], системах радиоэлектронной борьбы [6, 7], системах радиомониторинга, пространственной ориентации объектов по излучению искусственных спутников земли [8–10] и т.д.

Пеленгаторы могут располагаться как на земной поверхности, так и на борту подвижного носителя, в частности, воздушного. Двухкоординатные пеленгаторы имеют антенные системы, представляющие собой плоские или объемные (конформные) антенные решетки [11, 12]. Рассматриваются обзорные пеленгаторы с плоскими антенными решетками, состоящими из слабонаправленных элементов.

Расположение элементов антенной решетки на плоскости может быть различным. Оно описывается в некоторой системе координат, так что антенная решетка лежит в одной из координатных плоскостей. Обычно это прямоугольная Декартова система координат. Угловое положение источника излучения в результате измерений определяется относительно этой системы координат. Будем в дальнейшем называть ее связанной, имея в виду, что так называют систему, связанную со строительными осями объекта, на котором расположен пеленгатор [3]. Предположим далее, что пеленгатор расположен на борту подвижного воздушного объекта, который для решения своих задач выполняет различные эволюции. Положение антенной системы пеленгатора относительно земной топоцентрической системы координат будет при этом изменяться, причем угол поворота связанной системы относительно топоцентрической системы координат может достигать до 180 градусов. Однако потребителю пеленгационной информации, как правило, нужно знать угловые координаты источника радиоизлучения именно в топоцентрической системе. Материал статьи позволя-

ет по результатам измерений, полученных в связанной системе координат, определить угловое положение источника радиоизлучения в топоцентрической системе координат.

В работе [11] рассмотрен принцип работы двухкоординатного фазового пеленгатора с плоской антенной решеткой, базы которого располагаются на плоскости вдоль осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости земли.

На рис. 1 показаны азимут α и угол места β , характеризующие положение объекта наблюдения $C(x_c, y_c)$ относительно антенной системы, расположенной в плоскости x, O, y .

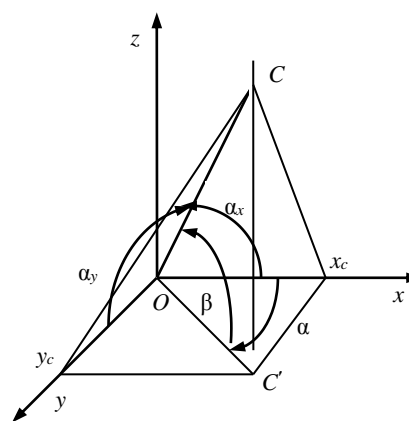


Рис. 1. Угловое положение объекта наблюдения в трёхмерном пространстве

На рис. 2 показано взаимное положение источника сигналов и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве, источник сигнала с координатами $C(x_c, y_c, z_c)$ и антенны с координатами $A_1(x_1, y_1)$ и $A_2(x_2, y_2)$.

Разность фаз сигналов, наведенных на антеннах A_1 и A_2 , определяется по формуле (1.2.5) из [11]

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(x_1 - x_2) \cos \alpha_x + (y_1 - y_2) \cos \alpha_y], \quad (1)$$

где $(x_1 - x_2)$, $(y_1 - y_2)$ – проекции вектора $\overline{A_1 A_2}$ на координатные оси.

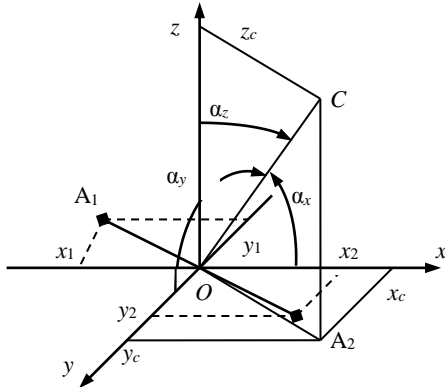


Рис. 2. Взаимное положение источника сигналов C и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве

Традиционно антенны двухкоординатных фазовых пеленгаторов располагают на плоскости вдоль осей прямоугольной декартовой системы координат.

Подобная антенная система имеет вид креста (рис. 3, а).

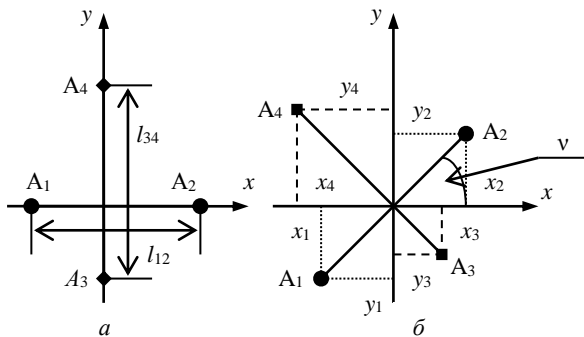


Рис. 3. Пример расположения антенн, образующих базы фазового пеленгатора, на плоскости.

При расположении баз вдоль осей координат (а) и при повороте баз относительно осей координат на угол ν (б).

При расположении баз вдоль осей координат (см. рис. 3, а) величины проекций вектора $\overline{A_1 A_2}$ на оси координат в формуле (1) будут равны $(x_1 - x_2) = l_{12}$ и $(y_1 - y_2) = 0$, а величины проекций вектора $\overline{A_3 A_4}$ будут равны $(x_3 - x_4) = 0$ и $(y_3 - y_4) = l_{34}$.

С учётом этого формулу (1) можно представить в виде (1.2.6), (1.2.7) из [11]

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} \cos \beta \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} \cos \beta \sin \alpha, \quad (3)$$

где Φ_{12} – полная разность фаз сигналов на антеннах A_1, A_2 ; Φ_{34} – полная разность фаз сигналов на антеннах A_3, A_4 .

Из формул (2) и (3) получим соотношения для вычисления азимута α и угла места β [11]

$$\alpha = \arctg \frac{\Phi_{34} l_{12}}{\Phi_{12} l_{34}}, \quad (4)$$

$$\beta = \arccos \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\Phi_{12}}{l_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Phi_{34}}{l_{34}}\right)^2}. \quad (5)$$

Формулы (4), (5) являются основой для расчёта азимута и угла места при традиционном построении двухкоординатных фазовых пеленгаторов.

При повороте АР относительно осей неподвижной системы координат на угол ν (см. рис. 3, б) проекции вектора $\overline{A_1 A_2}$ на оси координат в формуле (1) будут равны $(x_1 - x_2) = l_{12} \cos \nu$ и $(y_1 - y_2) = l_{12} \sin \nu$. А проекции вектора $\overline{A_3 A_4}$ на оси координат будут равны $(x_3 - x_4) = l_{34} \cos(90^\circ + \nu)$ и $(y_3 - y_4) = l_{34} \sin(90^\circ + \nu)$.

С учётом этого формулу (1), определяющую разность фаз сигналов, наведенных на антеннах A_1, A_2 и антеннах A_3, A_4 , можно представить в виде

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} [\cos \nu \cos \alpha_x + \sin \nu \cos \alpha_y], \quad (6)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} [\cos(90^\circ + \nu) \cos \alpha_x + \sin(90^\circ + \nu) \cos \alpha_y], \quad (7)$$

где ν – угол поворота антенной решетки.

Выполнив в формулах (6) и (7) ряд преобразований получим выражения полных разностей фаз сигналов, наведенных на антеннах A_1, A_2 и A_3, A_4 , аналогичные формулам (2), (3):

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi l_{12}}{\lambda} \cos \beta \cos(\alpha - \nu), \quad (8)$$

$$\Phi_{34} = \frac{2\pi l_{34}}{\lambda} \cos \beta \sin(\alpha - \nu). \quad (9)$$

При вычислении угла места по формуле (5) получим $\beta_{\text{ИЗМ}} = \beta$, а при вычислении азимута по формуле (4) $\alpha_{\text{ИЗМ}} = \alpha - \nu$.

Поворот АР относительно осей неподвижной топоцентрической системы координат формирует эффект изменения азимута на источник сигналов относительно осей координат этой системы при неизменном его положении.

Пеленг, предварительно вычисленный по формуле (4), будет соответствовать истинному значению в топоцентрической системе координат при дополнительном вычислении по формуле

$$\alpha = (\alpha_{\text{ИЗМ}} + \nu) - \left\langle \frac{\alpha_{\text{ИЗМ}} + \nu}{180^\circ} \right\rangle 180^\circ, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{ИЗМ}}$ – результат вычисления азимута по формуле (4); ν – угол поворота антенной решетки; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

При размещении плоской антенной решетки двухкоординатного фазового пеленгатора на некоторой высоте относительно поверхности земли по совокупности измеренных разностей фаз можно одновременно определить направления на источник сигналов как относительно осей координат, расположенных в плоскости антенной системы, так и относительно осей топоцентрической системы координат, расположенных в горизонтальной плоскости параллельно плоскости земли. Последнее определяется дополнительным алгоритмом вычисления пеленгов.

Положим, что плоскость x, O, y с антенной решеткой фазового пеленгатора (см. рис. 2) повернута вокруг оси Oy на 90° , поднята на высоту h и расположена в точке O_1 (рис. 4), а ось O_1x_1 перпендикулярна к плоскости антенной решетки.

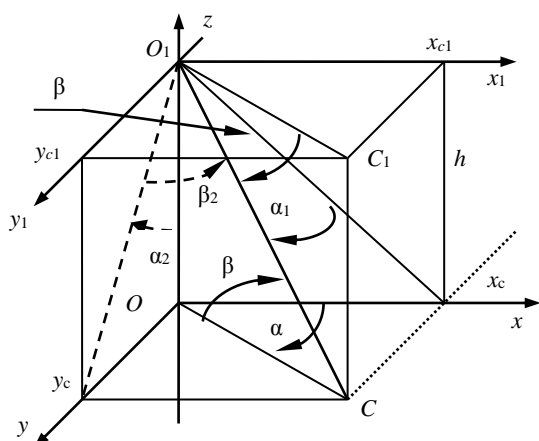


Рис. 4. Взаимное положение фазового пеленгатора и источника сигналов $C(x_c, y_c)$ в трёхмерном пространстве

Положение пеленгуемого источника сигналов $C(x_c, y_c)$ относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости, определяется по азимуту углом α , расположенным между осью Ox и прямой OC , а по углу места углом β , расположенным между проекцией прямой направления на объект O_1C на плоскость x, O, y (x_1, O_1, y_1) и прямой O_1C .

Положение пеленгуемого источника сигналов $C(x_c, y_c)$ относительно осей координат, расположенных в плоскости антенной системы (см. рис. 1), по азимуту определяется углом α_2 , расположенным между осью Oz и проекцией прямой O_1C на плоскость y, O, z , а по углу места углом β_2 , расположенным между проекцией прямой направления на объект O_1C на плоскость y, O, z и прямой O_1C .

Выразим пеленги α, β, α_2 , и β_2 через координаты источника сигналов $C(x_c, y_c)$.

Зададим величину подъёма антенной решетки $h > 0$ и удалённость пеленгуемого источника сигналов $x_c \gg h$.

При задании пеленга в плоскости x, O, y в пределах $\alpha = \pm \alpha_{\text{раб}}$ определяются: координата y_c , угол места β , угол места β_2 и азимут α_2 по формулам

$$y_c = x_c \operatorname{tg}(\alpha),$$

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}\right),$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}(y_c/h),$$

$$\beta_2 = \operatorname{arctg}\left(x_c/\sqrt{h^2 + y_c^2}\right),$$

где x_c и y_c – координаты источника излучения; h – высота подъёма антенной решетки пеленгатора относительно плоскости x, O, y .

По результатам вычисления по формулам (4), (5), (10) азимута α_2 и угла места β_2 выполняется вычисление азимута α и угла места β относительно осей топоцентрической системы координат, расположенных в горизонтальной плоскости, по формулам

$$y_c = h \operatorname{tg}(\alpha_2),$$

$$x_c = \sqrt{h^2 + y_c^2} \operatorname{tg}(\beta_2),$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(y_c/x_c), \tag{11}$$

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}\right), \tag{12}$$

По формулам (11), (12) вычисляются пеленги на источники сигналов, которые могут быть расположены ниже и выше плоскости $x_1O_1y_1$ (см. рис. 4). При определении полных разностей фаз, наведенных на антеннах пеленгатора по (2), (3), задаётся азимут $\alpha_2 = \pm \alpha_{\text{раб}}$ для источника сигналов, расположенного ниже плоскости $x_1O_1y_1$, или $\alpha_2 = 180^\circ \pm \alpha_{\text{раб}}$ для источника сигналов, расположенного выше плоскости $x_1O_1y_1$. Вычисленный по формуле (4) азимут в том и другом случае будет равен $\alpha_2 = \pm \alpha_{\text{раб}}$. Вычисленный по формуле (11) азимут будет правильным.

Вычисленный по формуле (5) угол места всегда положительный. При этом вычисленный по формуле (12) угол места не позволяет определить положение источника сигналов относительно плоскости $x_1O_1y_1$. Вычисленный по (12) угол места соответствует действительности только при известном положении пеленгуемых источников сигналов относительно плоскости $x_1 O_1 y_1$.

Таким образом, двухкоординатный фазовый пеленгатор, с плоской антенной решеткой, при вычислении пеленгов относительно осей топоцентрической системы координат по формулам (11), (12), используя результаты вычисленных пеленгов по (4), (5), преобразуется в фазовый пеленгатор, подобный пеленгатору с линейной антенной решеткой с луч-

шими характеристиками. У данного пеленгатора нет ошибок пеленгования, зависящих от угла места, и ошибок, определяемых поворотом антенной решетки относительно осей неподвижной системы координат, которые имеются у пеленгатора с линейной антенной решеткой.

Рассмотрим другой алгоритм обработки измеренных разностей фаз источника радиоизлучения при вычислении азимута и угла места в топоцентрической системе координат.

Разности фаз сигналов, наведенных на антеннах пеленгатора, выразим формулой, в которой азимут и угол места представлены относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости.

Расположение антенн фазового пеленгатора на плоскости приведено на рис. 3, а. Обозначим базу, образованную антеннами A_1, A_2 , как e_1 , а базу, образованную антеннами A_3, A_4 , как e_2 .

Взаимное положение источника сигналов $C(x_c, y_c)$ и антенн пеленгатора в трёхмерном пространстве показано на рис. 4. Положение пеленгуемого источника сигналов $C(x_c, y_c)$ относительно осей координат, расположенных в горизонтальной плоскости, описано выше.

Значение азимута, измеряемое фазовым пеленгатором с антенной решеткой, расположенной вдоль оси O_1y_1 , определяется углом α_1 , расположенным между проекцией прямой O_1C на плоскость x, O, z и прямой O_1C (см. рис. 4).

Полная разность фаз на базе, расположенной вдоль оси x (см. рис. 3, а), при измерении разности фаз в рад/2 π определяется по формуле

$$\Phi_1 = e_1 \sin \alpha \cos \beta + \delta_1, \quad (13)$$

где e_1 – величина базы в целых числах; α – азимут; β – угол места; δ_1 – ошибки измерений разности фаз.

Полная разность фаз на базе, расположенной вдоль оси y , при измерении разности фаз в рад/2 π определяется по формуле

$$\Phi_2 = e_2 \sin \beta + \delta_2, \quad (14)$$

где e_2 – величина базы в целых числах; β – угол места; δ_2 – ошибки измерений разности фаз.

При повороте антенной решетки относительно осей координат на угол ν (см. рис. 3, б) база e_1 будет расположена относительно положительного направления оси Ox под углом $\theta_1 = \nu$, а база e_2 под углом $\theta_2 = 90^\circ + \nu$.

Тогда при повороте АР на угол ν (см. рис. 3, б) полные разности фаз (13), (14) на базах e_1 и e_2 представим в виде

$$\Phi_1 = e_{1x} \sin \alpha \cos \beta + e_{1y} \sin \beta + \delta_1, \quad (15)$$

$$\Phi_2 = e_{2x} \sin \alpha \cos \beta + e_{2y} \sin \beta + \delta_2, \quad (16)$$

где α – азимут; β – угол места; δ_1, δ_2 – ошибки измерений разности фаз; $e_{1x}, e_{2x}, e_{1y}, e_{2y}$ – проекции векторов баз e_1 и e_2 на координатные оси

$$\left. \begin{aligned} e_{1x} &= e_1 \cos \theta_1, \\ e_{1y} &= e_1 \sin \theta_1, \\ e_{2x} &= e_2 \cos \theta_2, \\ e_{2y} &= e_2 \sin \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Работа двухкоординатного фазового пеленгатора при повороте антенной решетки относительно осей координат xOy на угол ν (см. рис. 3, б), реализуется при наличии алгоритма вычисления пеленга, который обеспечивает выполнение двух задач.

Первая задача состоит в устранении неоднозначности измерения разностей фаз на базах по одному из алгоритмов. В работе [11] рассмотрен максимально правдоподобный алгоритм устранения неоднозначности фазовых измерений. Алгоритм устранения неоднозначности фазовых измерений для линейных антенных решеток приведен в работе [13].

Вторая задача состоит в вычислении азимута и угла места в соответствии с выбранным алгоритмом.

Далее предположим, что ошибки измерений разностей фаз отсутствуют. Величины полных разностей фаз (15), (16) определяются суммой составляющих, одна из которых зависит от азимута, а другая от угла места.

Задача разделения информации о полной разности фаз (15), (16) на составляющие в общем виде выполняется по формулам

$$\Phi_\alpha = \Phi_1 \mp \Phi_2 = (e_{1x} \mp e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta + (e_{1y} \mp e_{2y}) \sin \beta, \quad (18)$$

$$\Phi_\beta = \Phi_1 \pm \Phi_2 = (e_{1x} \pm e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta + (e_{1y} \pm e_{2y}) \sin \beta. \quad (19)$$

Знаки \pm в формулах (18), (19) определяются знаками проекций векторов баз e_1 и e_2 на оси координат (17).

Представим угол поворота антенной решетки формулой

$$\nu = (45^\circ m) \pm \gamma, \quad (20)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$; $\gamma = 0^\circ, \dots, 22,5^\circ$.

Разделение информации о полной разности фаз (18), (19) на составляющие, зависящие от азимута и от угла места, выполняется при равенстве по абсолютной величине проекций векторов баз на оси координат (17).

В табл. 1 приведены величины проекций векторов баз e_1 и e_2 на оси координат при повороте АР на угол ν (20) и $\gamma = 0^\circ$.

При повороте АР на угол $\nu = \pm 45^\circ$ (см. табл. 1) формулы (18), (19) представим в виде

$$\Phi_\alpha = \Phi_1 \mp \Phi_2 = (e_{x1} \mp e_{x2}) \sin \alpha \cos \beta, \quad (21)$$

$$\Phi_\beta = \Phi_1 \pm \Phi_2 = (e_{y1} \pm e_{y2}) \sin \beta. \quad (22)$$

При расположении баз АР вдоль осей координат величины проекций баз e_1 и e_2 (см. табл. 1) определяют вид формулы (15), (16):

при равенстве угла поворота $\nu = 0^\circ$ и $\nu = 180^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= e_{1x} \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= e_{2y} \sin \beta; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

при равенстве угла поворота $\nu = 90^\circ$ и $\nu = 270^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= e_{2x} \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= e_{1y} \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Т а б л и ц а 1

Таблица проекций векторов баз e_1 и e_2 на оси координат при повороте АР на угол ν

Угол поворота АР ν	Величины проекций векторов баз на оси координат при равенстве $e_1 = e_2 = 1$			
	e_{1x}	e_{1y}	e_{2x}	e_{2y}
0°	1	0	0	1
45°	0,707	0,707	-0,707	0,707
90°	0	1	-1	0
135°	-0,707	0,707	-0,707	-0,707
180°	-1	0	0	-1
225°	-0,707	-0,707	0,707	-0,707
270°	0	-1	1	0
315°	0,707	-0,707	0,707	0,707
360°	1	0	0	1

При расположении баз АР относительно осей координат под углом $\pm 45^\circ$ величины проекций векторов баз e_1 и e_2 (см. табл. 1) определяют вид формул (21), (22):

при равенстве угла поворота $\nu = 45^\circ$ и $\nu = 225^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= \Phi_1 - \Phi_2 = (e_{1x} - e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= \Phi_1 + \Phi_2 = (e_{1y} + e_{2y}) \sin \beta; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

при равенстве угла поворота $\nu = 135^\circ$ и $\nu = 315^\circ$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_\alpha &= \Phi_1 + \Phi_2 = (e_{1x} + e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \\ \Phi_\beta &= \Phi_1 - \Phi_2 = (e_{1y} - e_{2y}) \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Полные разности фаз (23), (24), (25), (26) представим в виде

$$\Phi_\alpha = q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2 = (q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \sin \alpha \cos \beta, \quad (27)$$

$$\Phi_\beta = q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2 = (q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}) \sin \beta, \quad (28)$$

где $q_1 = \pm 1$, $q_2 = 0, 1$, $q_3 = 0, 1$ – коэффициенты, соответствующие углу поворота АР ν (20), преобразующие формулы (27), (28) к одному из видов (23)–(26).

Значение коэффициентов q_1, q_2, q_3 определяется по величине чисел, найденных по формуле

$$q_i = \langle \nu / 45^\circ \rangle,$$

где ν – угол поворота АР (20); $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Обозначим далее искомые значения азимута и угла места, как α_1 и β_1 . Из формул (27) и (28) получим соотношения для вычисления синуса азимута и синуса угла места:

$$\sin \alpha_1 = \frac{q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta}, \quad (29)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}. \quad (30)$$

Подставим в (29) и (30) значения полных разностей фаз Φ_1 (15) и Φ_2 (16). Выполнив ряд преобразований, получим выражения, определяющие значения синуса азимута и синуса угла места при повороте АР относительно осей координат на угол ν

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha + \sin \beta \frac{q_3 e_{1y} - q_1 q_2 e_{2y}}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta}, \quad (31)$$

$$\sin \beta_1 = \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \frac{q_2 e_{1x} + q_1 q_3 e_{2x}}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}, \quad (32)$$

где α и β – истинные значения азимута и угла места.

Из формул (31), (32) видно, что при вычислении синуса азимута и синуса угла места по (29), (30) в результатах вычисления кроме информации об истинном значении азимута и угла места содержатся величины, определяющие ошибки вычисления пеленгов при изменении положения антенной решетки. Ошибки вычисления синуса азимута (31) зависят от угла места, а ошибки вычисления синуса угла места (32) зависят от азимута. Степень влияния азимута и угла места на величины ошибок пеленгования определяется величиной дроби в правой части выражений.

Представим дроби в (31), (32) в виде формул

$$h_\alpha = \frac{q_3 e_{1y} - q_1 q_2 e_{2y}}{q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}}, \quad (33)$$

$$h_\beta = \frac{q_2 e_{1x} + q_1 q_3 e_{2x}}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}}. \quad (34)$$

Из формул (29), (30) получим выражения для вычисления азимута и угла места

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{q_3 \Phi_1 - q_1 q_2 \Phi_2}{(q_3 e_{1x} - q_1 q_2 e_{2x}) \cos \beta_1} \right), \quad (35)$$

$$\beta_1 = \arcsin \left(\frac{q_2 \Phi_1 + q_1 q_3 \Phi_2}{q_2 e_{1y} + q_1 q_3 e_{2y}} \right). \quad (36)$$

Ошибки при вычислении пеленгов по (35), (36) в отличие от случайных ошибок пеленгования, зависящих от ошибок измерения разностей фаз, являются систематическими ошибками и могут быть исключены или существенно уменьшены при известных значениях азимута и угла места при вычислении по формулам

$$\alpha_2 = \alpha_1 - h_\alpha \beta, \quad (37)$$

$$\beta_2 = \beta_1 - h_\beta \alpha, \quad (38)$$

где α_1 и β_1 – результаты вычисления азимута и угла места по (35), (36); h_α и h_β , – по (33), (34); α и β – истинные значения азимута и угла места.

Математическое моделирование

Методом математического моделирования выполнена сравнительная оценка ошибок пеленгования при вычислении азимута и угла места по формулам (35), (36) и при уточнении по формулам (37), (38).

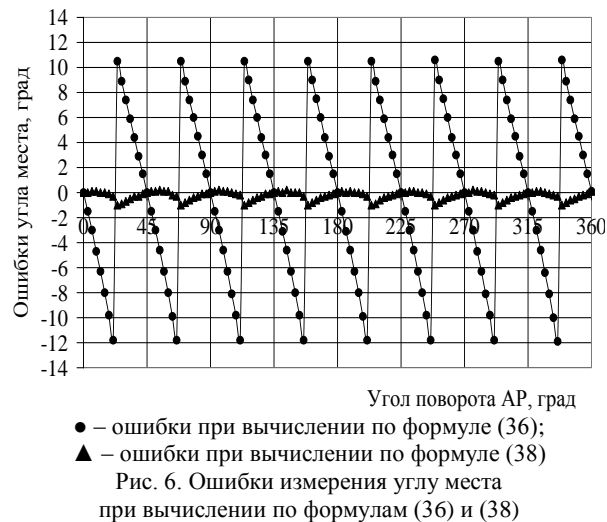
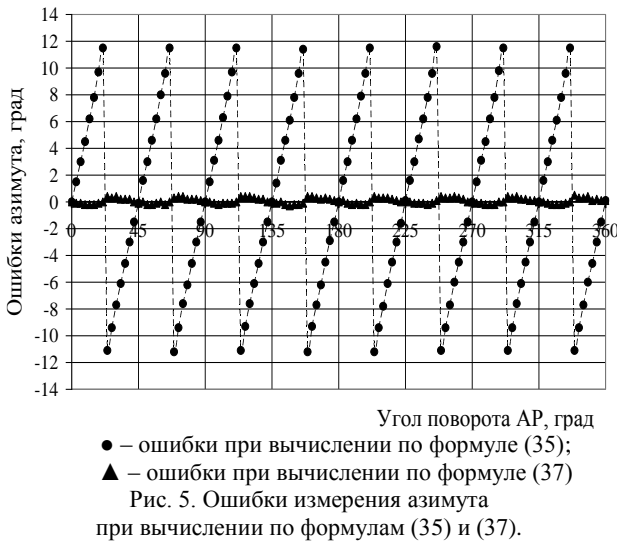
При моделировании задавались следующие условия: азимут $\alpha = \pm 30^\circ$; угол места $\beta = \pm 30^\circ$; величины СКО измерения разностей фаз $\sigma_\phi = 0^\circ$; вектор относительных баз каждой из линейных антенных решеток $\vec{e} = (9, 6, 4)$, вариант 6 таблицы [14, с. 30]; угол поворота антенной решетки плавный в пределах $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$.

При величине угла поворота АР $\nu = \pm 45^\circ$ полные разности фаз (21), (22) определяются суммой проекций векторов баз на оси координат, величина которой больше максимальной базы в $\sqrt{2}$ раз. Для обеспечения работы пеленгатора в секторах $\alpha = \pm 30^\circ$ и $\beta = \pm 30^\circ$ величины баз в минимальной длине волны определены по формуле

$$l_i / \lambda_{\min} \leq e_i / \sqrt{2},$$

где l_i – расстояние между антеннами, образующими базу; λ_{\min} – минимальная длина волны пеленгуемого источника сигнала; e_i – величина базы в целых числах.

Ошибки пеленгования при вычислении пеленгов по формулам (35)–(38) приведены на графиках рис. 5, 6.



Из графиков рис. 5, 6 видно, что при расположении баз вдоль осей прямоугольной системы координат и при повороте антенной решетки на углы, кратные 45° при $\gamma = 0^\circ$ (20), при вычислении пеленгов по (35), (36) ошибок пеленгования нет. При отклонении антенной решетки от положений, оговоренных выше, ошибки пеленгования отличны от нуля и достигают максимума при $\gamma = 22,5^\circ$.

При вычислении пеленгов по формулам (37), (38) ошибки пеленгования уменьшаются в разы относительно ошибок пеленгования полученных при вычислении пеленгов по формулам (35), (36).

Реально при работе фазовых пеленгаторов нет информации об истинном значении азимута и угла места.

Исходной и единственной информацией о величинах азимута и угла места являются результаты, вычисленные по (35) и (36), с ошибками вычисления пеленгов в пределах $\pm 12^\circ$ (см. рис. 5, 6).

Рассмотрим способ уменьшения ошибок пеленгования на основании формул (37), (38) методом итераций. Представим формулы (37), (38) в виде

$$\alpha_i = \alpha_1 - h_\alpha \beta_{i-1}, \quad (39)$$

$$\beta_i = \beta_1 - h_\beta \alpha_{i-1}, \quad (40)$$

где α_1 и β_1 – результаты вычисления азимута и угла места по (35), (36); h_α и h_β , – по (33), (34); $i = 2, 3, \dots$ – номер последовательного вычисления.

Методом математического моделирования выполнена оценка ошибок пеленгования при вычислении азимута и угла места по формулам (35), (36) и при их уточнении по формулам (39), (40).

Моделирование выполнено при условиях, оговоренных выше. Угол поворота антенной решетки задавался по формуле

$$\nu = g \cdot 360^\circ,$$

где g – случайные числа в диапазоне от 0 до 1.

На графике рис. 7 показан пример положения АР относительно осей координат (см. рис. 3, б) при задании полных разностей фаз по (15), (16) при вычислении пеленгов по формулам (35)–(40).

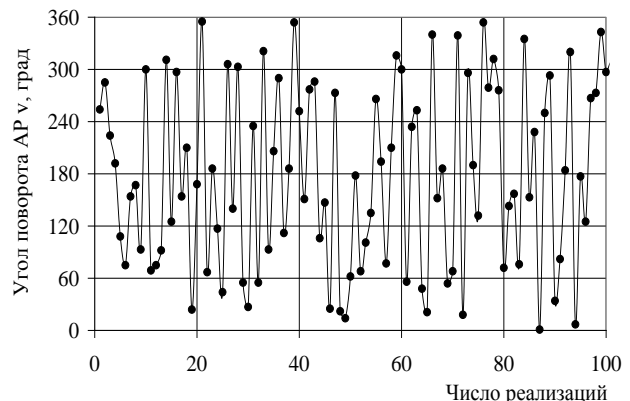
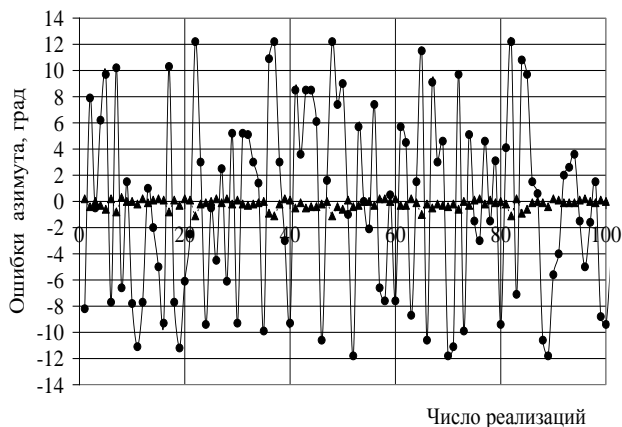


Рис. 7. Угол поворота АР относительно осей координат

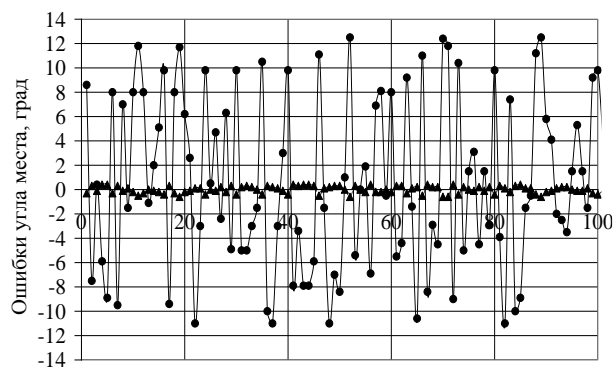
Результаты ожидаемых ошибок пеленгования при вычислении пеленгов по формулам (35), (36) и

при трёхкратном уточнении по формулам (39), (40) приведены на графиках рис. 8, 9.



● – ошибки при вычислении по формуле (35);
▲ – ошибки при вычислении по формуле (39)

Рис. 8. Ошибки измерения азимута при вычислении пеленгов по формулам (35) и (39)



● – ошибки при вычислении по формуле (36);
▲ – ошибки при вычислении по формуле (40)

Рис. 9. Ошибки измерения углу места при вычислении пеленгов по формулам (36) и (40)

Из графиков рис. 8, 9 видно, что ошибки вычисления пеленгов уменьшаются в разы при итерационном вычислении по формулам (39), (40) относительно ошибок, полученных при вычислении по формулам (35), (36).

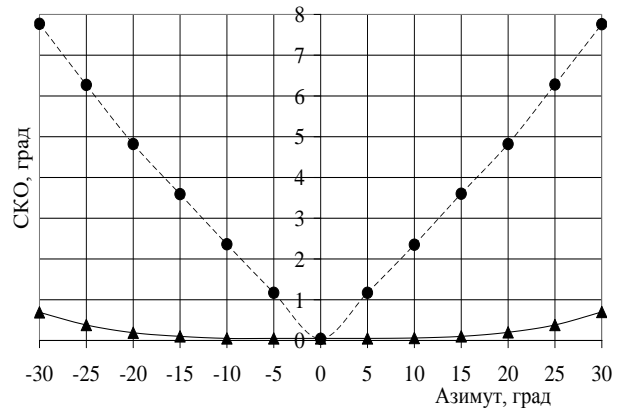
На графиках рис. 10 приведена зависимость СКО измерения угла места от изменения азимута, заданного в пределах $\pm 30^\circ$, при вычислении пеленгов по формулам (36) и (40).

Угол поворота антенной решетки в пределах $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$. Угол места $\beta = 0^\circ$.

На графиках рис. 11 приведена зависимость СКО измерения азимута от изменения угла места, заданного в пределах $\pm 30^\circ$, при вычислении пеленгов по формулам (35) и (39).

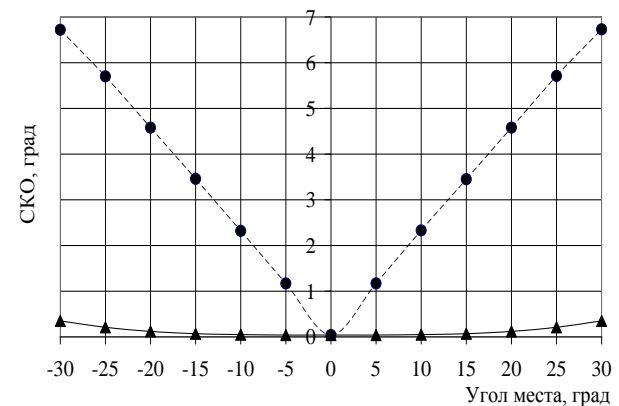
Угол поворота антенной решетки в пределах $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$. Азимут $\alpha = 0^\circ$.

В табл. 2 приведены усредненные оценки СКО пеленгования при повороте антенной решетки относительно осей координат в пределах $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$ и при задании азимута и угла места в пределах $\pm 30^\circ$. Ошибки измерения разности фаз приняты равными нулю.



● – СКО измерения угла места при вычислении по (36);
▲ – СКО измерения угла места при вычислении по (40)

Рис. 10. Зависимость СКО измерения угла места от азимута



● – СКО измерения азимута при вычислении по (35);
▲ – СКО измерения азимута при вычислении по (39)

Рис. 11. Зависимость СКО измерения азимута от угла места

В первой строке (см. табл. 2) приведены результаты, полученные при вычислении пеленгов по формулам (35), (36). Во второй, третьей, четвертой и пятой строках приведены результаты при последовательном уточнении пеленгов по формулам (39), (40). В шестой строке приведен результат, полученный при задании истинных значений азимута и угла места при вычислении пеленгов по формулам (37), (38).

Таблица 2

Результаты оценки СКО пеленгования		
Номер вычисления	СКО пеленгования при $\alpha = \pm 30^\circ$ и $\beta = \pm 30^\circ$	
	$\sigma_{\alpha i}$, град	$\sigma_{\beta i}$, град
1	6,8	6,74
2	1,54	1,7
3	1,01	1,02
4	0,33	0,28
5	0,21	0,26
6	0,22	0,34

Из табл. 2 видно, что трёхкратное уточнение искомых пеленгов (строка 4) по формулам (39), (40) уменьшает ошибки вычисления на порядок.

Реально ошибки пеленгования зависят от ошибок измерения разностей фаз, которые случайны, и от ошибок, возникающих вследствие поворота антенной решетки относительно осей топоцентриче-

ской системы координат. Вычислены оценки СКО пеленгования при учете всех названных факторов, при задании полных разностей фаз по формулам (15), (16).

В табл. 3 (первая строка) приведены усреднённые оценки СКО пеленгования, ожидаемые при задании ошибок измерения разностей фаз $\sigma_\phi = 30^\circ$ и при повороте АР в пределах $\nu = 0^\circ \div 360^\circ$. Оценки выполнены при трёхкратном уточнении пеленгов по формулам (39), (40).

Во второй строке приведены оценки СКО пеленгования при $\sigma_\phi = 30^\circ$, нулевых значениях азимута и угла места, исключающих влияние поворота АР относительно осей координат на точность вычисления пеленгов.

Таблица 3

Результаты оценки СКО пеленгования

Заданные условия при оценке ошибок пеленгования	СКО пеленгования	
	σ_α , град	σ_β , град
$\alpha = \pm 30^\circ$, $\beta = \pm 30^\circ$	1,28	1,06
$\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$	0,94	0,92

Как видно из таблицы, при наличии случайных погрешностей измерения разностей фаз имеют место методические погрешности измерения азимута и угла места. Однако они могут быть уменьшены дальнейшим применением итерационного алгоритма.

Выводы

Предложенные алгоритмы вычисления пеленгов позволяют по результатам измерений, полученных в связанной системе координат, вычислять угловое положение источника радиоизлучения в топосцентрической системе координат.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FTWM-2020-0039.

Литература

1. Золотарев И.Д. Фазометрическая аппаратура для метеорных исследований // Изв. ТПИ. – 1960. – Т. 105. – С. 72–78.
2. Дудко Б.П. Радионавигация. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2003. – 160 с.
3. Белавин О.В. Основы радионавигации. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
4. Южаков В.В. Фазовые интерферометры в микроволновых системах посадки: обзор // Зарубежная радиоэлектроника. – 1977. – № 6. – С. 50–66.
5. Сосновский А.А. Радиотехнические средства ближней навигации и посадки летательных аппаратов / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович. – М.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
6. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузовская книга, 2013. – 360 с.
7. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Военное изд-во, 1989. – 342 с.
8. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Военное изд-во, 2001. – 456 с.
9. Способ угловой ориентации объекта. Патент RU 2580827 С1 / Ратушняк В.Н., Дмитриев Д.Д., Фатеев Ю.Л., Тяпкин В.Н., Кремез Н.С., Гарин Е.Н. // Опубликовано: 10.04.2016. – Бюл. № 10.

10. Васин В.А. Информационные технологии в радиотехнических системах / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др., под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 762 с.

11. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.

12. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 147 с.

13. Порубов Г.Г. Алгоритм устранения неоднозначности и вычисления пеленга в многобазовых фазовых пеленгаторах // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 22–27.

14. Порубов Г.Г. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 25–32.

Порубов Геннадий Гаврилович

Инженер ОАО «НИИАП», г. Новосибирск
Дзержинского пр-т, 87, г. Новосибирск, Россия, 630051
Тел.: + 7 (383-2) 79-52-28
Эл. почта: porub27@mail.ru

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р тех. наук, профессор каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp15@sibmail.com

Porubov G.G., Denisov V.P.

Calculating the topocentric coordinates of the radio emission source according to the measurement results of the phase direction finder on board a mobile object

The algorithm to calculate the azimuth and the elevation angle on the source of radio emission in the topocentric system of coordinates is suggested according to the measurements done by the phase direction finder located on board a mobile object. The position of an aerial system direction finder to the earth topocentric system of coordinates can be changed. The change in the position of the aerial system influences the accuracy of calculating the bearings. The method to reduce the errors of bearing by iteration method is considered. The checking procedure of the algorithm by mathematical modelling is carried out.

Keywords: phase direction finder; antenna array; calculation of the bearing; estimation of the bearing errors.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-7-15

References

1. Zolotarev I.D. *Fazometricheskaya apparatura dlya meteornyuh issledovaniy* [Phase-meter devices for meteor investigations]. *Izvestiya TPI*, 1960, vol. 105, pp. 72–78 (in Russ.).
2. Dudko B.P. *Radionavigatsia* [Radionavigation]. Tomsk: Publishing office of TUSUR University, 2003. 160 p. (in Russ.).

3. Belavin O.V. *Osnovi radionavigatsii* [Fundamentals of radionavigation]. Moscow, Sovetskoye radio, 1977, 320 p. (in Russ.).

4. Yuzhakov V.V. *Fazovye interferometri v mikrovolnovih sistemah posadki* [Phase interferometers in microwave systems of landing]. *Review. Foreign radioelectronics*. 1977, no. 6. pp. 50–66 (in Russ.).

5. Sosnovskii A.A., Khaimovich I.A. *Radiotekhnicheskie sredstva blizhney navigatsii i posadki letatel'nykh apparatov* [Radiotechnical means of short-range navigation and aircraft landing]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 200 p. (in Russ.).

6. Kuprianov A.I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Electronic warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2013. 360 p. (In Russ.).

7. Palij A.I. *Radioelektronnaya bor'ba* [Radioelectronic warfare]. Moscow, Military Publishing House, 1989. 342 p. (in Russ.).

8. Smirnov Ju.A. *Radiotekhnicheskaya razvedka* [Radio reconnaissance]. Moscow, Military Publishing House, 2001. 456 p. (in Russ.).

9. Ratushnyak V.N., Dmitriev D.D., Fateev Ju.L., Tyapkin V.N., Kremez N.S., Garin E.N.. *Sposob uglovoj orientatsii objekta* [Method of the object angular orientation]. Patent RF no. 2580827, 2016.

10. Vasin V.A., Vlasov I.B., Egorov Ju. M. and others published under Fedorov I.B. *Informatsionnie tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemah* [Information technologies in radiotechnical systems]. Moscow, Publishing House of MSTU after Bauman, 2003. 762 p. (in Russ.).

11. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatori* [Phase radio direction finders]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2002, 251 p. (in Russ.).

12. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk, Publishing office of TUSUR University, 2007. 147 p. (in Russ.).

13. Porubov G.G. *Algoritm ustraneniya neodnaznachnosti i vichisleniya pelenga v mnogobazovykh fazovykh pelengatorah* [Algorithm of eliminating ambiguity and calculating bearing in multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 22–27 (in Russ.).

14. Porubov G.G., Denisov V.P. *Metodika rascheta anten'nykh struktur mnogobazovykh fazovykh pelengatorov* [Methods of calculating the structures of antenna arrays for multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 25–32 (in Russ.).

Gennadiy G. Porubov

Engineer, OJSC «NIIAP», Novosibirsk
87, Dzerzhinsky pr., Novosibirsk, Russia, 630051
Phone: + 7 (383-2) 79-52-28
Email: porub27@mail.ru

Vadim P. Denisov

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of
Radio Engineering Systems, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-70
Email: dvp15@simmail.com