

## Способ многоканального пеленгования наземных источников радиоизлучений с борта космического аппарата, находящегося на геостационарной орбите

А.А. Гельцер, А.А. Мещеряков, В.Ю. Баженов\*, В.К. Кухтин\*

НИИ РТС ТУСУР, г.Томск, ул. Вершинина 72, and@front.ru, \*ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева», г.Железногорск.

Предложена структура моноимпульсного многоканального пеленгатора космического базирования, приведены алгоритмы обработки сигналов и оценка погрешностей пеленгования, полученная с помощью математического моделирования.

The monopulse multichannel space-based direction finder structure is proposed. The signal processing algorithms and direction finding error estimation are given, that are obtained using mathematical modeling.

**Введение.** В настоящей работе рассмотрен способ многоканального пеленгования наземных источников радиоизлучений предназначенный для решения задачи предотвращения несанкционированного доступа в спутниковых системах связи.

Данные о необходимости специальных систем радиомониторинга космического исполнения имеются, в частности в работах [3, 4]. Рассмотрим алгоритм моноимпульсного определения двумерного пеленга амплитудным пеленгатором, построенным на базе многолучевой антенной системы.

**Постановка задачи.** Рассмотрим антенную систему с тремя лучами. Лучи разнесены относительно центра антенной системы по азимуту и углу места, направления их осей привязаны к центру антенной системы (АС). Выбор количества лучей обусловлен тем, что для определения двумерного моноимпульсного пеленга, три луча - это минимальное число, а большее количество лучей можно представить сочетаниями из трех лучей. Структурная схема пеленгатора изображена на рис. 1.

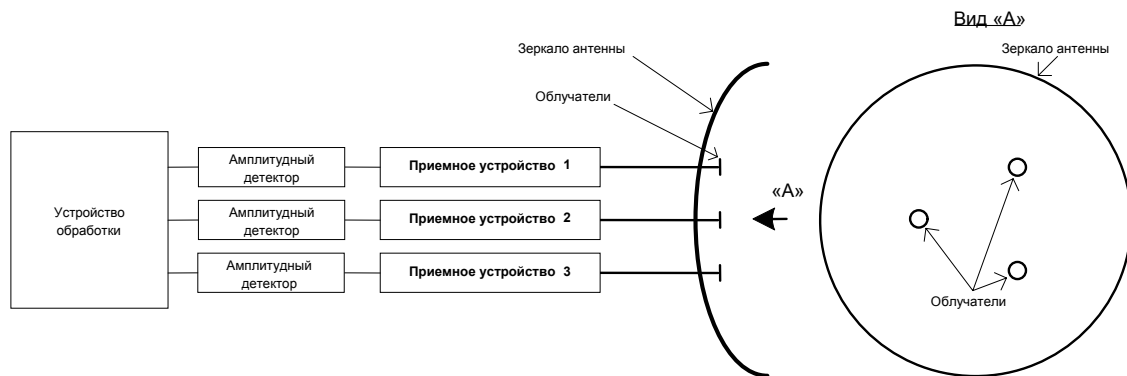


Рис.1 – Структурная схема амплитудного пеленгатора, образованного тремя лучами антенной системы

Огибающие сигналов  $S_i(t)$  на выходах амплитудных детекторов, изображенных на рис.1, в общем случае зависят от пеленга на ИРИ и расстояния до него, параметров антенной системы, параметров излучаемого сигнала как:

$$S_i(t) = \left| \dot{D}(\alpha - \alpha_i, \beta - \beta_i) \dot{E}(t) \dot{P}(\lambda, R, G, P_{II}) \right|, \quad (1)$$

где  $\dot{D}(\alpha - \alpha_i, \beta - \beta_i)$  - комплексный нормированный множитель  $i$ -го луча диаграммы направленности антенной системы, зависящий от азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$ , характеризующих положение ИРИ и угловых координат центров лучей АС по азимуту и углу места  $\alpha_i, \beta_i$ , соответственно;  $\dot{E}(t)$  - комплексная огибающая сигнала,

излучаемого ИРИ;  $\dot{P}(\lambda, R, G, P_H)$  - комплексный множитель, зависящий от длины волны  $\lambda$ , расстояния от КА до ИРИ  $R$ , излучаемой ИРИ в направлении КА мощности  $P_H$  и коэффициента усиления приемной антенны  $G$ .

**Алгоритм определения пеленга.** Полагая в соотношении (1) величины  $\dot{E}(t)$ ,  $\dot{P}(\lambda, R, G, P_H)$  неизвестными, будем определять пеленг, исходя из измеренных значений амплитуд сигналов с выхода амплитудных детекторов. Алгоритм заключается в вычислении отношений измеренных амплитуд сигналов и поиска в пеленгационных характеристиках точек, угловые координаты которых соответствуют отношениям измеренных амплитуд. Его отличие от классического метода определения пеленга заключается в применении итерационного метода наименьших квадратов. Информативным параметром алгоритма является отношение измеренных амплитуд огибающих сигналов:

$$F_{ij}(\alpha, \beta) = \frac{S_i(t)}{S_j(t)} = \frac{|\dot{D}(\alpha - \alpha_i, \beta - \beta_i)\dot{E}(t)\dot{P}(\lambda, R, G, P_H)|}{|\dot{D}(\alpha - \alpha_j, \beta - \beta_j)\dot{E}(t)\dot{P}(\lambda, R, G, P_H)|} = \frac{|\dot{D}(\alpha - \alpha_i, \beta - \beta_i)|}{|\dot{D}(\alpha - \alpha_j, \beta - \beta_j)|} \quad (2)$$

Реализация алгоритма заключается в процедуре минимизации функционала [1,2]:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}})^T \mathbf{R} (\mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{F}$  - вектор-столбец отношений измеренных амплитуд размерностью  $3 \times 1$ , элементы вектора  $\mathbf{F}$  определяются как:  $\mathbf{F} = [F_{12}(\alpha, \beta) \ F_{13}(\alpha, \beta) \ F_{23}(\alpha, \beta)]^T$ ;  $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$  - вектор-столбец оценок отношений амплитуд, функционально связанных с оценкой пеленга;  $\mathbf{R}$  - весовая матрица размером  $3 \times 3$ , равная единичной при равноточных измерениях. Данная оценка совпадает с максимально-правдоподобной при гауссовом распределении шумов равноточных измерений.

Решение находится путем последовательных приближений к искомой оценке:

$[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_n = [\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_{n-1} + \boldsymbol{\xi}_n$ ,  $n = 0, 1, \dots$ , где  $[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_n$  -  $n$ -ое приближение вектора искомых оценок размерностью 2;  $\boldsymbol{\xi}_n$  - вектор поправок размерностью  $2 \times 1$ , рассчитываемый на  $n$ -й итерации в точке  $[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_{n-1}$ . Начальное значение вектора оцениваемых параметров  $[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_0$  задается с учетом дополнительной информации, или от известных угловых координат особенной точки, например, от точки с известными угловыми координатами равносигнального направления антенной системы.

Вектор поправок рассчитывается как  $\boldsymbol{\xi} = (\mathbf{A}^T \mathbf{R} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R} \mathbf{C}$ , где  $\mathbf{C} = \mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}}$  - вектор-столбец невязок (или ошибок прогнозирования), который представляет собой разность измеренных параметров и рассчитанных, исходя из предполагаемых угловых координат ИРИ. Размерность вектора  $\mathbf{C}$  равна размерности вектора измеренных параметров  $\mathbf{F}$ . Вектор  $\mathbf{C}$  рассчитывается на каждой итерации в точке  $[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_{n-1}$ . Элементы вектора  $\mathbf{C}$  определяются следующим образом:  $c_k = F_k - \hat{F}_k(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ . Далее,  $\mathbf{A}$  - матрица частных производных вектора  $\mathbf{F}$  по каждому из оцениваемых параметров (азимуту и углу места), рассчитываемая на каждой итерации в точке  $[\hat{\alpha}, \hat{\beta}]_{n-1}$ . Размерность матрицы  $\mathbf{A}$  -  $3 \times 2$ .

Итерации продолжаются до тех пор, пока абсолютная величина приращения  $\boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi}$  не уменьшится до некоторого предела, или же можно ограничить число итераций искусственно.

**Результаты моделирования.** Моделирование было проведено для антенной системы, изображенной на рис. 1. Диаграмма направленности (ДН) состояла из трех

одинаковых лучей, разнесенных по азимуту и углу места на одинаковое угловое расстояние. Облучатели, формирующие лучи, расположены в вершинах равностороннего треугольника, центр которого совпадает с центром зеркала. Форма одного луча описывается выражением:

$$D(\alpha, \beta) = \frac{\sin(w\sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{w\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}, \quad (4)$$

где  $w$  - параметр определяющий ширину главного лепестка функции  $D(\alpha, \beta)$ .

Ширина нормированной диаграммы направленности главного лепестка луча задавалась равной 0,5 град по уровню 0,707, при этом параметр  $w=101,56$ . Вид одного луча антенной системы, с заданными таким образом параметрами, изображен на рис.2.

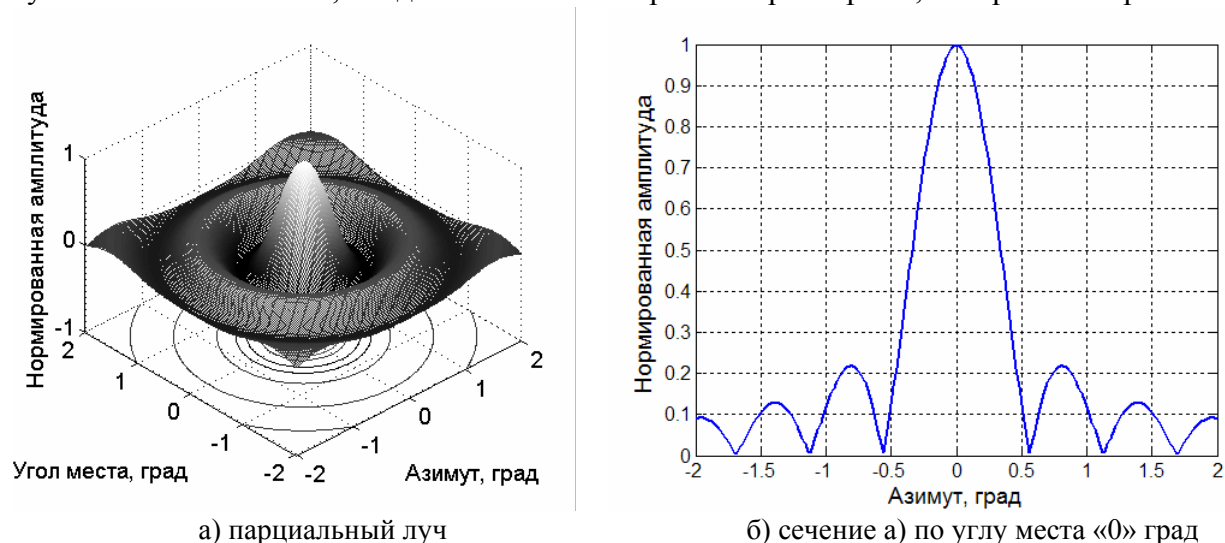


Рис.2 - Вид парциального луча антенной системы и его сечения по углу места  $\beta = 0$

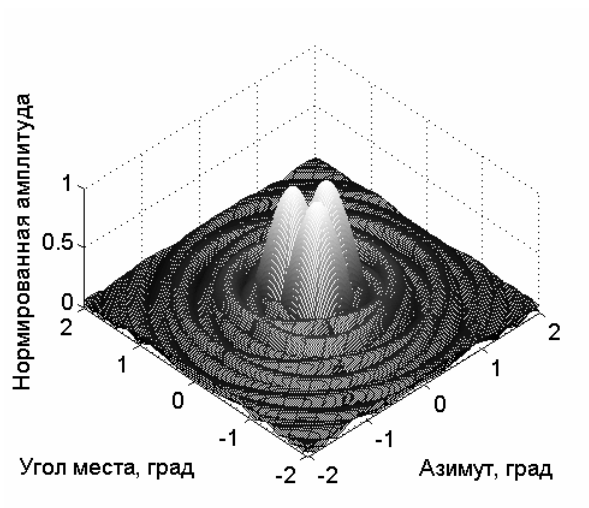
Объединение трех таких лучей, разнесенных по азимуту и углу места и образующих общую диаграмму направленности АС, изображено на рис.3.

Оценим размер зоны, в которой ошибка определения угловых координат ИРИ  $\sigma_{err}$  не превышает наперед заданную максимальную ошибку  $\sigma_{err}^{max}$  для случая, когда отсутствуют ошибки измерения амплитуд, т.е. области, в которой алгоритм не расходится и дает точную оценку. Величина ошибки  $\sigma_{err}$  рассчитывается по формуле:

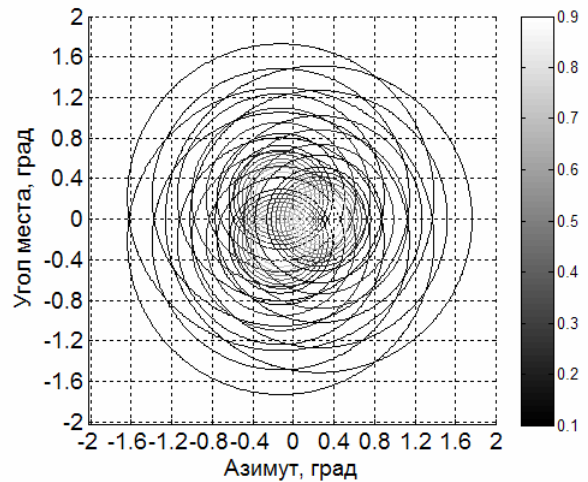
$$\sigma_{err} = \sqrt{(\alpha - \hat{\alpha})^2 + (\beta - \hat{\beta})^2}, \quad (5)$$

где  $\alpha, \beta$  - истинные значения угловых координат;  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  - вычисленные по предложенному алгоритму.

Чтобы получившиеся результаты расчета можно было согласовать с рис.3, ошибка определения угловых координат (5) рассчитывалась с малым шагом в области  $\pm 2$  град по азимуту и углу места от центра антенной системы.



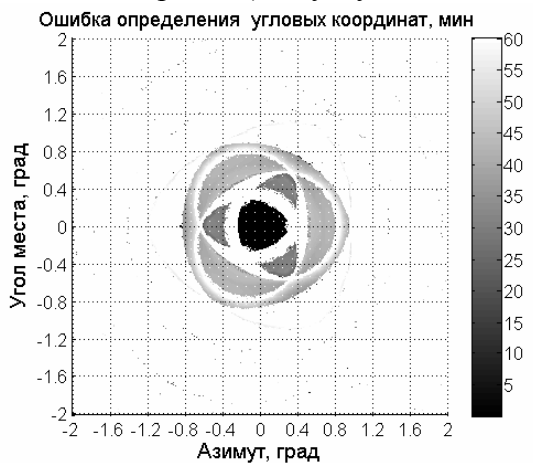
а) общий вид ДН из трех разнесенных лучей



б) то же что и а) вид сверху; построенный линиями равного уровня

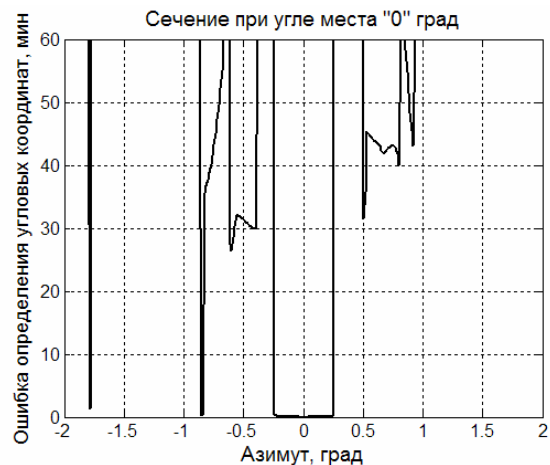
**Рис.3 – Общий вид диаграммы направленности антенной системы состоящей из трех лучей**

Результаты расчета значений  $\sigma_{err}$  для рассматриваемой области угловых координат приведены на рис.4 а). Дополнительно на рис.4 б) приведено сечение зависимости рис.4 а) по углу места «0» град.



а) ошибки  $\sigma_{err}$  при условии что все, где

$$\sigma_{err} > \sigma_{err}^{\max} = \sigma_{err}^{\max}, \sigma_{err}^{\max} = 60 \text{ мин}$$



б) сечение зависимости а) по углу места «0» град

**Рис.4 –Оценки ошибки определения угловых координат без влияния шума**

Теперь оценим точность определения угловых координат при условии воздействия шума на измеряемые амплитуды сигналов в трех лучах. Рассмотрим случай, когда отношение сигнал/шум достаточно велико, чтобы считать шум распределенным по нормальному закону со средним, равным амплитуде сигнала. Тогда имеет место следующее выражение:

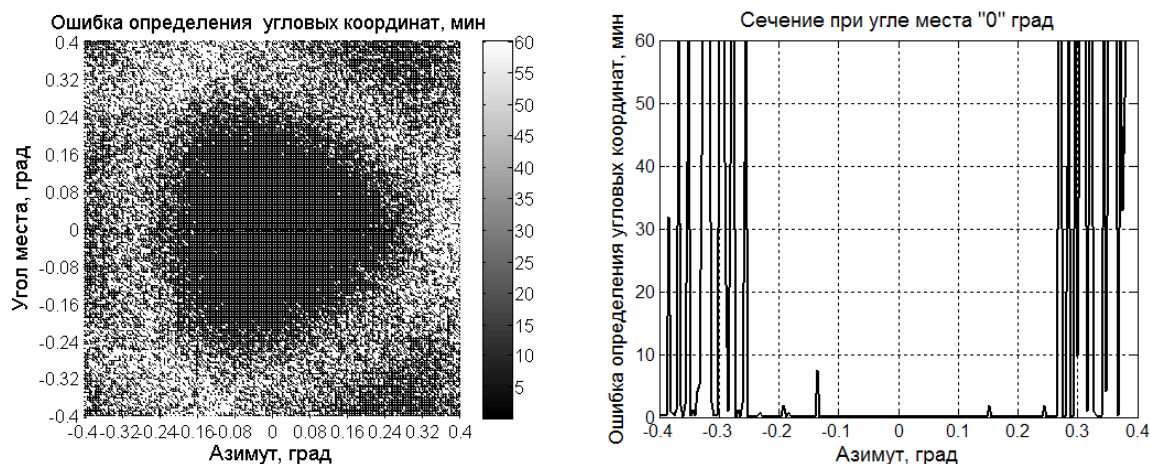
$$S_i^{шум}(t) = S_i(t) + n(t), \quad (6)$$

где  $n(t)$  - аддитивный шум, распределенный по нормальному закону.

Оценку точности будем проводить по формуле (6), внося в величины измеренных амплитуд шум согласно (7). Зона существенной точности (рабочая зона алгоритма), как видно из рис.4, лежит в пределах окружности с диаметром равным ширине лепестка

одного луча, равной в данном случае 0,5 град. Для сокращения времени моделирования, будем рассматривать зону с размерами  $\pm 0,4$  град.

Зададим следующие параметры: количество опытов в каждой точке  $m = 100$ ; в рассматриваемой зоне амплитуды сигналов лучей близки к единице, поэтому зададим нормированную СКО шума равной  $\sigma_{n(t)} = 0,2$ , тогда отношение сигнал/шум равно:  $q = 20 \log_{10}(1/0,2) = 14$  дБ. Результаты численного моделирования приведены на рис. 5.



а) ошибки  $\sigma_{err}$  при условии, что  $\sigma_{err} > \sigma_{err}^{\max} = \sigma_{err}^{\max}$ , где  $\sigma_{err}^{\max} = 60$  мин

б) сечение зависимости а) по углу места «0» град; в диапазоне  $\pm 0,25$  град среднее значение  $m=0,14$  мин; СКО=0,7 мин

**Рис.5 – Ошибки определения угловых координат при наложении шума, полученные при параметрах:  $m = 100$ ,  $q = 14$  дБ**

Полученные оценки ошибок определения угловых координат при влиянии шума, позволяют говорить о работоспособности рассмотренного метода определения угловых координат.

Таким образом, указанную методику многоканального пеленгования наземных источников можно использовать в системах радиомониторинга космического исполнения. Дальнейшая работа направлена на оценку точностных характеристик предлагаемой системы космического базирования с учетом всех факторов, влияющих на точность наведения антенны.

## Литература

1. В.Ю. Лебедев Вторичная обработка данных в пассивной радиолокационной системе. Труды 2-й Всероссийской научно-технической конференции по проблемам создания перспективной авионики «Авионика-2003». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2003 г., с. 297-302.
2. Н.М. Иванов, В.С. Онищенко, В.Н. Шевчук Метод разделения лучей поляризованного электромагнитного поля // Антенны. 2009. №9. С. 52-58.
3. В.И. Могучев, В. В.Герасимов, А.А. Ляховкин Выявление местоположения абонентских ЗС при несанкционированном доступе в спутниковых системах связи. Материалы конференции icsc'98. 1998.
4. С. П. Панько, В. В. Сухотин Несанкционированный доступ в системы спутниковых коммуникаций, "Успехи современной радиоэлектроники", 2002. №4.