

## АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА, ПРИХОДЯЩЕГО ОТ ОБЪЕКТА ЛОКАЦИИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ИСТИННОГО УГЛА ПОДЛЕТА

А.В. Бурдыга

anis7511@gmail.com

SPIN-код: 8808-7403

А.С. Логвиненко

anna.logvinenko.bmstu@mail.ru

SPIN-код: 8826-9030

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*В данной статье речь пойдет о сущности принимаемого сигнала приемниками от объекта локации, о том, что может послужить помехой в его правильной расшифровке и опознавании истинного направления подлета. Целью моделирования является выявление верного угла подлета объекта. Для этого было рассмотрено влияние отраженного сигнала от подстилающей поверхности на точность распознавания направления объекта локации, построена модель антенной решетки, учтена диаграмма направленности каждой антенны, сформированы сигналы на приемниках антенн, с помощью алгоритма поиска ближайшего решена проблема с искажением сигнала по причине отражения от земли.*

### Ключевые слова

*Пеленг, антенная решетка, угол места, азимут, алгоритм поиска ближайшего, подстилающая поверхность, диаграмма направленности, оценка угла, опорные гипотезы*

Поступила в редакцию 28.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** В настоящее время для точного поражения целей очень важно правильно оценить пеленг: его направление, дальность и мощность.

Многие факторы влияют на определение местоположения объекта локации, например, искусственные помехи, естественные шумы, различные переотражения от подстилающих поверхностей при любых погодных условиях в зависимости от рельефа местности. В данной статье рассмотрено уменьшение влияния рельефа на точность пеленгации. В [1, 2] представлены различные модели подстилающих поверхностей и рассеивания сигнала на них. В общем случае фаза принятого сигнала, являющегося суммой отраженных сигналов от объекта локации и подстилающей поверхности, не соответствует действительному направлению.

Существует множество способов решения данной проблемы, например, алгоритм фазового отождествления, амплитудной моноимпульсной пеленгации, поиска ближайшего, который использовался в данной работе и др.

В работе [3] использовали алгоритм амплитудной моноимпульсной пеленгации, с помощью которого была решена задача повышения точности опреде-

ления угловых координат на фоне аддитивного шума. Применение метода Кейпоне удобно для случая, когда количество источников сигнала неизвестно [4]. А в [5] рассмотрен метод максимального правдоподобия для низко летящих объектов локации в условиях отражения от водной поверхности. Также данный метод часто применяют в условиях шума при определении угловых координат двух близко расположенных объектов [6]. В данной работе была использована модель подстилающей поверхности земли, которая в отличие от водной имеет свойство частичного поглощения сигнала.

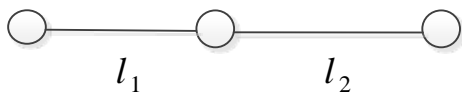


Рис. 1. Антенная решетка

**Математическая модель.** Прежде чем переходить непосредственно к сути проблемы, представим математическую модель описываемой ситуации.

Антенная решетка представляет собой три антенны (рис. 1), расположенные на одной прямой.

Расстояние между антеннами ( $l_1, l_2$ ) разное. Сама антенная решетка располагается на некоторой высоте от земли. Объект представляем как точечный [7].

Для дальнейших расчетов зададимся упрощенной прямолинейной траекторией объекта по направлению к началу системы координат (СК), поскольку основная задача сводится к нахождению правильного направления подлета, и начальным положением, которое в течение времени будет изменяться для каждой антенны по-разному: расстояние и угол для каждой антенны будут различными (рис. 2), кроме центральной антенны, так как ее берем за начало СК, поэтому по мере приближения объекта углы относительно нее изменяться не будут.

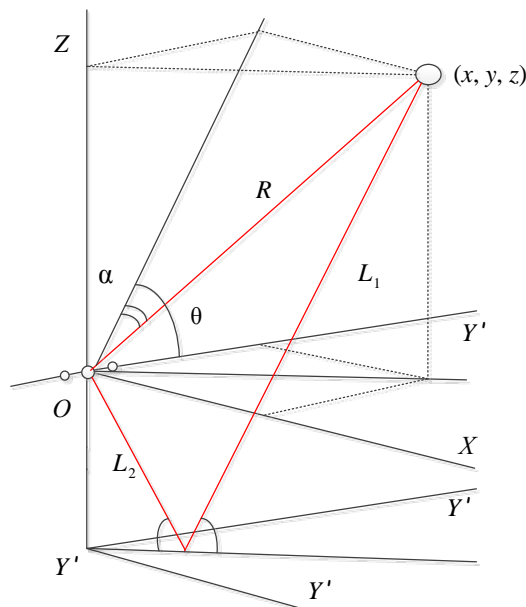


Рис. 2. Траектория полета цели

Угол места  $\theta$  в случае горизонтального расположения антенн не изменяется, поскольку направление объекта локации совпадает с центральной. Соответственно, все вычисления зависят от азимута  $\alpha$ .

**Диаграмма направленности отдельной антенны.** Учтем, что диаграмма направленности (ДН) пришедшего сигнала на антенну имеет некоторые поправки в виде коэффициента в виду направления действия приемника [8].

Рассчитаем расстояние, которое прошел пеленг напрямую от объекта к антенне, и углы места и атаки в каждый момент времени:

$$R = \sqrt{(x - x_{pr})^2 + (y - y_{pr})^2 + (z - z_{pr})^2},$$

где  $R$  — расстояние от цели до антенны;  $x, y, z$  — координаты объекта;  $x_{pr}, y_{pr}, z_{pr}$  — координаты антенны на антенной решетке;

$$\alpha = \arccos \left( \sqrt{(y - y_{pr})^2 + \frac{(z - z_{pr})^2}{R}} \right);$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{y - y_{pr}}{\sqrt{(y - y_{pr})^2 + (z - z_{pr})^2}} \right).$$

В зависимости от углов  $\alpha$  и  $\theta$  сигнал будет иметь разную амплитуду, фиксируемую приемником антенны (рис. 3) [9].

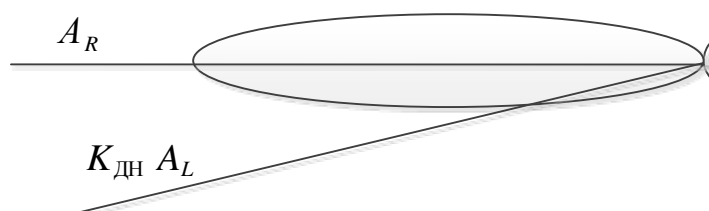


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны

Зададим ДН по азимуту и углу места:

$$DN_{az} = \frac{\sin(K_{\text{ДН}} \alpha)}{K_{\text{ДН}} \alpha};$$

$$DN_{um} = \frac{\sin(K_{\text{ДН}} \theta)}{K_{\text{ДН}} \theta},$$

где  $K_{\text{ДН}}$  — коэффициент диаграммы направленности.

Сформируем амплитуду прямого сигнала:

$$Ampl_R = A_R \cdot DN_z \cdot DN_{um},$$

где  $A_R$  — амплитуда неискаженного сигнала.

**Учет отражения от подстилающей поверхности.** Подстилающая поверхность также может поглощать часть сигнала, отраженного на нее от объекта локации, поэтому введем еще один коэффициент

$$A_L = k \cdot A_R,$$

где  $k$  — коэффициент ослабления, и внесем поправку в амплитуду сигнала, обусловленную наличием ДН:

$$Ampl_L = A_L DN_{az} \cdot DN_{um}.$$

Также рассчитаем расстояние, пройденное этим пеленгом от объекта до антенны (рис. 3). Для этого разделим весь путь на два участка: от объекта до земли  $L_1$  и от земли до антенны  $L_2$ :

$$L_1^2 = z_{pr}^2 + \frac{z_{pr} \sqrt{(x - x_{pr})^2 + (y - y_{pr})^2}}{(R \sin \theta + z_{pr})^2};$$

$$L_2^2 = (R \sin \theta + z_{pr})^2 + \frac{R \sin \theta \sqrt{(x - x_{pr})^2 + (y - y_{pr})^2}}{(R \sin \theta + z_{pr})^2};$$

$$L = \sqrt{L_1^2 + L_2^2}.$$

**Формирование сигналов на приемниках решетки.** На следующем шаге сформируем сигналы на каждом приемнике антенны с учетом сдвига по фазе. Сначала найдем разность фаз на двух ближайших приемниках, поскольку на ближайшем к цели приемнике никакого отставания не было, то фаза на нем равна нулю (рис. 4).

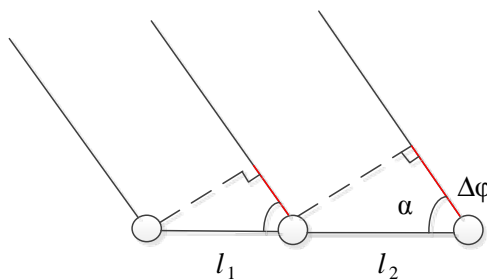


Рис. 4. Сдвиг по фазе на приемниках

Рассчитываем сдвиг по фазе для каждого приемника.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l \sin \alpha}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $\omega$  — круговая частота волны;  $l$  — расстояние между приемниками.

Затем вычисляем фазу сигнала на каждом приемнике:

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi.$$

На следующем шаге формируем сигналы:  
прямой

$$S_R = \text{Ampl}_R e^{j(\omega t + \varphi)}$$

и переотраженный

$$S_L = \text{Ampl}_L e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Из полученных данных и путем их суммирования выявляем общий сигнал, который воспринимает приемник [9]:

$$S_{sum} = S_R + S_L.$$

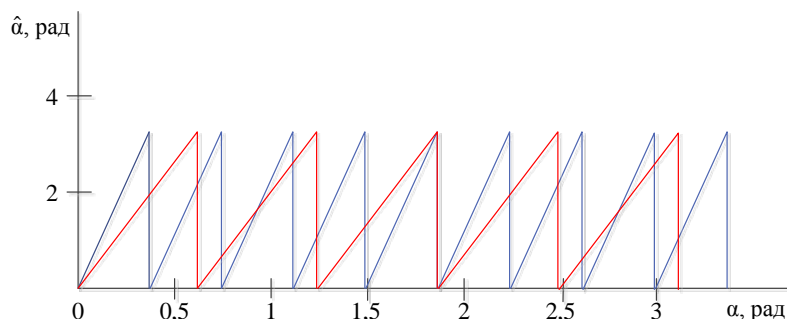
В таком случае при вычислении пеленга объекта локации фаза суммарного сигнала не будет соответствовать действительному направлению. В связи с этим необходимо синтезировать алгоритм, учитывающий возможность появления сигналов переотражения от земной поверхности на входе приемников.

Рассмотрим оценку по азимуту

$$\hat{\alpha} = \arcsin\left(\frac{\Delta\hat{\varphi} \cdot \lambda}{2\pi l}\right),$$

где  $\Delta\hat{\varphi} = \arctg\left(\frac{\text{Im}(S)}{\text{Re}(S)}\right)$ ;  $\text{Im}(S)$ ,  $\text{Re}(S)$  — мнимая и действительная составляющие сигнала.

Для наглядности построим график его зависимости от истинного значения (рис. 5) (истинное значение получено от сигнала, пришедшего непосредственно от объекта).



**Рис. 5.** Зависимость оценки угла от его истинного значения для двух приемников антенной решетки

Отсюда следует, что определенному значению оценки соответствует несколько значений истинного угла. Для устранения этой неоднозначности воспользуемся алгоритмом поиска ближайшего (рис. 6).

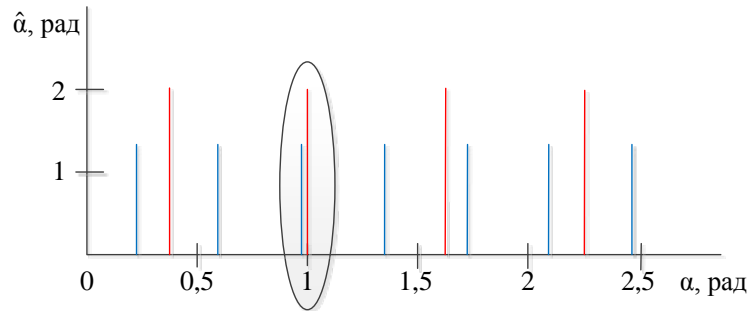


Рис. 6. Пеленги по двум каналам (— гипотезы по первому каналу, — гипотезы по второму каналу)

**Алгоритм поиска ближайшего.** Для начала найдем наименьшее необходимое количество опорных гипотез, т.е. значений истинного угла при полученной оценке угла, из условия

$$|\Delta\hat{\phi} + 2\pi m| < \frac{2\pi l}{\lambda}.$$

Тогда соответствующее количество минимальных опорных гипотез

$$m < \frac{l}{\lambda} + \frac{\Delta\hat{\phi}}{2\pi}.$$

Таким образом, все пеленги опорного канала различаются между собой на некоторую величину — период, через который они повторяются:

$$\sin_i \alpha = \sin_i \hat{\alpha} + mT,$$

где  $T = \lambda/l$ .

По полученным углам  $\alpha$  сравниваются две соседние гипотезы. И те гипотезы, которые находятся ближе, будут соответствовать истинному значению угла подлета объекта локации. Получается, что время на пересчет ближайших уходит гораздо меньше, чем если бы проводилось сравнение каждой гипотезы одного канала, с гипотезами другого.

**Выводы.** Подводя итоги, отметим, что основная проблема заключалась в подборе правильного метода и расчета двух ближайших гипотез. Поскольку в реальных условиях невозможно отличить прямой сигнал объекта локации от переотраженного от подстилающей поверхности, был использован метод, позволяющий даже при суммировании двух приходящих сигналов на антенную решетку быстрее и точнее выбрать правильное направление. В дальнейшем на основе разработанного алгоритма поиска ближайшего для двух каналов воз-

можно построение более сложных для определения пеленга при рассмотрении моделей помех, представленных большим числом переотражений.

### Литература

- [1] Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М., Радиотехника, 2004.
- [2] Beckmann P., Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Pergamon Press, 1963.
- [3] Логинов А.А., Морозов О.А., Семенова М.Ю. Алгоритмы повышения точности оценки пеленга в задаче амплитудной моноимпульсной пассивной локации. *Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского*, 2010, № 5(2), с. 358–362.
- [4] Шипитко О.С. Моделирование и реализация метода Кейпона. *Молодежный научно-технический вестник*, 2014, № 11. URL: <http://ainsnt.ru/doc/744881.html>
- [5] Покровская Е.А. Работа измерителя высоты низколетящей цели с учетом влияния отражений от взволнованной морской поверхности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 2, с. 29–38.  
URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/simul/hidden/194.html>
- [6] Матюнин Д.В., Силин С.И., Жураковский В.Н. Определение направлений на отражающие объекты методом максимального правдоподобия при ограниченном числе лучей, формируемых антенной решеткой. *Антенны*, № 7, 2016, с. 35–39.
- [7] Казаринов Ю.М., ред. Радиотехнические системы. М., Высшая школа, 1990.
- [8] Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. Нижний Новгород, ННГУ, 2007.
- [9] Кубанов В.П. Направленные свойства антенных решеток. Самара, ПГУТИ, 2011.
- [10] Пирогов А.А., Жураковский В.Н. Моделирование сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности. *Инженерный вестник*, № 5, 2017.  
URL: <http://ainjournal.ru/doc/858827.html>

**Бурдыга Александра Владимировна** — студентка кафедры «Ракетные и импульсные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Логвиненко Анна Сергеевна** — инженер отдела Информационные управляющие системы научного исследовательского института специального машиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**ANALYSIS AND MODELING OF A SIGNAL COMING FROM A LOCATION OBJECT, DETERMINATION OF HIS TRUE ANGLE OF AN APPROACH**

**A.V. Burdyga**

anis7511@gmail.com

SPIN-code: 8808-7403

**A.S. Logvinenko**

anna.logvinenko.bmstu@mail.ru

SPIN-code: 8826-9030

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

*The paper deals with the essence of the received signal by receivers from the object location that may interfere with its correct decoding and recognition of the true direction of approach. The purpose of the simulation is to identify the correct angle of object's approach. For this, the authors consider the influence of the reflected signal from the underlying surface on the accuracy of recognizing the direction of the location object. In this paper, the authors designed a model of the antenna array, and the directivity pattern of each antenna was taken into account, signals were generated at the antenna receivers, the problem of distorting the signal due to reflection from the ground was solved using the nearest search algorithm.*

**Keywords**

*Bearing, antenna array, elevation angle, azimuth, algorithm for finding the nearest, underlying surface, directivity pattern, angle estimation, reference hypotheses*

Received 28.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

**References**

- [1] Bakulev P.A. Radiolokatsionnye sistemy [Radiolocation systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. (in Russ.)
- [2] Beckmann P., Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Pergamon Press, 1963.
- [3] Loginov A.A., Morozov O.A., Semenova M.Yu. Algorithm of angle estimation precision increase for amplitude monopulse passive direction-finding. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2010, no. 5(2), pp. 358–362. (in Russ.)
- [4] Shipit'ko O.S. Simulation and realization of Capon method. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2014, no. 11. URL: <http://ainsnt.ru/doc/744881.html> (in Russ.)
- [5] Pokrovskaya E.A. Operation of instrument to measure altitude of low flying target with allowance for influence of reflections from uneven sea surface. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2008, no. 2, pp. 29–38. URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/simul/hidden/194.html> (in Russ.)
- [6] Matyunin D.V., Silin S.I., Zhurakovskiy V.N. Estimating the bearings of reflectors using the maximum likelihood method with a limited number of rays generated by the antenna array. *Antenny* [Antennas], no. 7, 2016, pp. 35–39. (in Russ.)



- [7] Kazarinov Yu.M., ed. Radiotekhnicheskie sistemy [Radio-technical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. (in Russ.)
- [8] Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i pomekh, prinimaemykh antennoy reshetkoy [Methods for parameters assessment of sources of signals and clutters received by array]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2007. (in Russ.)
- [9] Kubanov V.P. Napravlennyye svoystva antennoykh reshetok [Directional response of antenna arrays]. Samara, PGUTI Publ., 2011. (in Russ.)
- [10] Pirogov A.A., Zhurakovskiy V.N. Simulation of signals, reflected from wavy sea surface. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering bulletin], no. 5, 2017.  
URL: <http://ainjournal.ru/doc/858827.html> (in Russ.)

**Burdyga A.V.** — Student, Department of Missile and Kinetic Warfare Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Logvinenko A.S.** — Engineer, Department of Information and Control System of Special Engineering, Scientific Research Institute, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.