

УДК 621.396.96

## СЕЛЕКЦИЯ ИСТИННЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ПЕЛЕНГОВ МЕТОДОМ ПОДСТАНОВОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ТРИАНГУЛЯЦИИ

В.А. АПОРОВИЧ, А.И. МИНОВ, Т.В. ПРОКОФЬЕВА

ОАО «АГАТ - системы управления» – управляющая компания холдинга  
«Геоинформационные системы управления»  
Независимости, 117, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 26 февраля 2016

В настоящее время проблема селекции истинных пересечений пеленгов постановщиков активных помех не имеет удовлетворительного решения. В данной статье предложен новый алгоритм с использованием метода подстановок. Моделирование показывает существенные преимущества этого метода по сравнению с известным алгоритмом.

*Ключевые слова:* постановщики активных помех, триангуляция, селекция истинных пересечений, метод подстановок.

### Введение

Одним из методов определения координат постановщиков активных помех (ПАП) остается метод триангуляции. Главной задачей при использовании метода триангуляции является задача выделения (селекции) истинных пересечений пеленгов и отбрасывание ложных. До последнего времени эта задача не имела приемлемого решения [1, 2], особенно при относительно больших ошибках измерения угловых координат ПАП радиолокационными станциями (РЛС). Для ее решения предлагается использовать алгоритмы на основе метода подстановок (МП) [3].

### Постановка задачи

Задачу будем решать при следующих условиях:

а) в качестве источников информации о пеленгах на ПАП (цели) будут использоваться две РЛС (РЛС-1 и РЛС-2);

б) РЛС выдают информацию о пеленгах в виде «азимут» – «угол места»;

в) количество пеленгов, получаемых от каждой из РЛС, равно количеству ПАП;

г) каждый пеленг соответствует одному ПАП.

В качестве системы координат (СК) примем прямоугольную СК с центром в условной точке на поверхности Земли. Ось  $X$  направлена на север, ось  $Y$  – по нормали вверх, ось  $Z$  дополняет систему до правой. Кривизну Земли не учитываем.

Исходная информация для решения задачи следующая:  $(X_{rdr1}, Y_{rdr1}, Z_{rdr1})$  – координаты точки стояния 1-го источника;  $(X_{rdr2}, Y_{rdr2}, Z_{rdr2})$  – координаты точки стояния 2-го источника;  $n$  – количество целей (ПАП);  $\beta_i^{(1)}, \varepsilon_i^{(1)}$  – азимут и угол места  $i$ -й цели (пеленг), полученный от РЛС-1 ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $\beta_i^{(2)}, \varepsilon_i^{(2)}$  – азимут и угол места  $i$ -й цели (пеленг), полученный от РЛС-2.

Выходной информацией задачи является матрица соответствия пеленгов размерностью  $n \times n$ , где номера строк и столбцов  $i$  соответствуют номерам пеленгов от РЛС-1 и РЛС-2. Элементы матрицы принимают значения: «1» – если принято решение, что пересечение пеленгов истинное – соответствует цели (ПАП), и «0» – в противном случае. Очевидно, в соответствии с условиями в) и г) в каждой строке и каждом столбце может быть только одна единица. Имея матрицу соответствия, далее не трудно рассчитать все три координаты ПАП.

## Общий алгоритм

Общий алгоритм решения задачи сводится к двум блокам:

- блок расчета координат пересечений;
- блок селекции пересечений.

В блоке расчета координат пересечений рассчитываются трехмерные координаты точек пересечений (строго – точки скрещивания). Пример изображения точек пересечения в плоскости  $X-Z$  приведен на рис. 1.

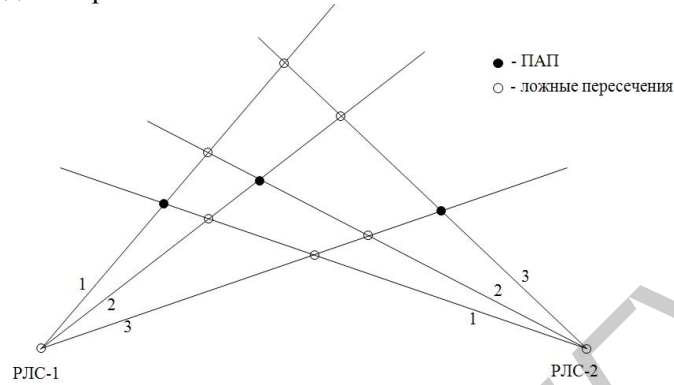


Рис. 1. Пример изображения точек пересечения в плоскости  $X-Z$

Производится расчет значений [3]:  $X_{j,k}$  – координата  $X$  точки пересечения  $j$ -го пеленга от первого источника и  $k$ -го пеленга от второго источника,

$$X_{j,k} = X_{rdr1} + \frac{(X_{rdr1} - X_{rdr2}) \cdot \sin(\beta_k^{(2)}) - (Z_{rdr1} - Z_{rdr2}) \cdot \cos(\beta_k^{(2)})}{\sin(\beta_j^{(2)} - \beta_k^{(2)})} \cdot \cos(\beta_j^{(1)});$$

$Z_{j,k}$  – координата  $Z$  точки пересечения  $j$ -го пеленга от первого источника и  $k$ -го пеленга от второго источника,

$$Z_{j,k} = Z_{rdr1} + \frac{(X_{rdr1} - X_{rdr2}) \cdot \sin(\beta_k^{(2)}) - (Z_{rdr1} - Z_{rdr2}) \cdot \cos(\beta_k^{(2)})}{\sin(\beta_j^{(2)} - \beta_k^{(2)})} \cdot \sin(\beta_j^{(1)});$$

$Y_{j,k}^{(1)}$  – координата  $Y$  точки пересечения  $j$ -го пеленга от первого источника и  $k$ -го пеленга от второго источника, рассчитанная по углу места от первого источника,

$$Y_{j,k}^{(1)} = \operatorname{tg}(\varepsilon_j^{(1)}) \cdot \sqrt{(X_{rdr1} - X_{j,k})^2 + (Z_{rdr1} - Z_{j,k})^2};$$

$Y_{j,k}^{(2)}$  – координата  $Y$  точки пересечения  $j$ -го пеленга от первого источника и  $k$ -го пеленга от второго источника, рассчитанная по углу места от второго источника,  $Y_{j,k}^{(2)} = \operatorname{tg}(\varepsilon_k^{(2)}) \cdot \sqrt{(X_{rdr2} - X_{j,k})^2 + (Z_{rdr2} - Z_{j,k})^2}$ ,  $j, k = 1, 2, \dots, n$ .

В блоке селекции пересечений формируется матрица соответствия пеленгов с помощью заданного алгоритма.

### Алгоритмы МП

Для всех алгоритмов на основе МП рассматриваются все возможные подстановки вида

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{pmatrix},$$

где первой строке соответствуют номера пеленгов от первого источника,

второй строке – номера пеленгов от второго источника. Каждая подстановка взаимно однозначно соответствует одной из возможных комбинаций точек пересечения пеленгов.

В данной работе рассмотрены два алгоритма:

- с учетом высоты точек пересечения (МП-В) [3];
- предлагаемый алгоритм с учетом угла места точек пересечения (МП-У).

Для пояснения описания алгоритмов приведен рис. 2.

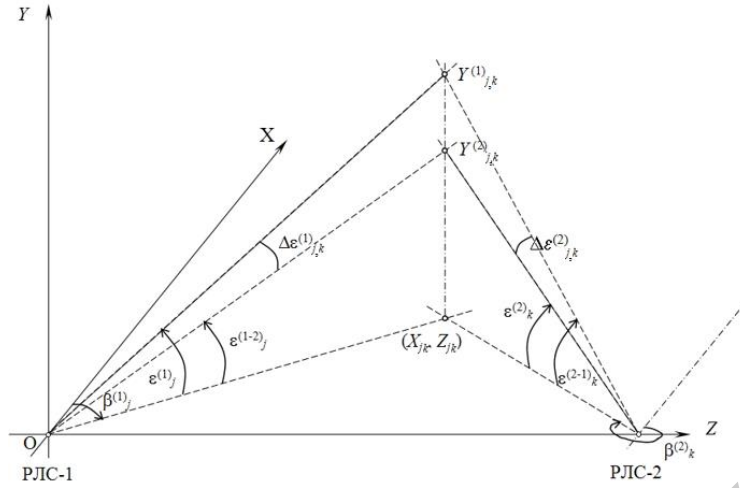


Рис. 2. Схема пространственного расположения пересечений пеленгов

Алгоритм МП-В [3]. Для каждой подстановки  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{pmatrix}$  рассчитываются значения

$$Y_{mean}^{(1)} = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{j,k_j}^{(1)}}{n}, \quad Y_{mean}^{(2)} = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{j,k_j}^{(2)}}{n}; \quad \Delta Y_{max}^{(1)} = \max_{j=1, \dots, n} |Y_{j,k_j}^{(1)} - Y_{mean}^{(1)}|, \quad \Delta Y_{max}^{(2)} = \max_{j=1, \dots, n} |Y_{j,k_j}^{(2)} - Y_{mean}^{(2)}|;$$

$$\Sigma \Delta Y_{max} = \Delta Y_{max}^{(1)} + \Delta Y_{max}^{(2)}.$$

Из множества всех подстановок выбираем подстановку  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ kt_1 & kt_2 & \dots & kt_n \end{pmatrix}$  с наименьшим значением  $\Sigma \Delta Y_{max}$ . Соответствующую ей комбинацию точек принимаем за множество истинных пересечений.

Алгоритм МП-У. Для одной РЛС, например первой, дополнительно для каждой точки пересечения пеленгов рассчитываются углы места, под которыми эти точки наблюдались бы, если бы имели высоты  $Y_{j,k}^{(2)}$ , рассчитанные по углам места от второго источника (рис. 2)

$$\epsilon_{j,k}^{(1-2)} = \arctg \left( \frac{Y_{j,k}^{(2)}}{\sqrt{(X_{rdr1} - X_{j,k})^2 + (Z_{rdr1} - Z_{j,k})^2}} \right), \quad j, k = 1, 2, \dots, n.$$

Для каждой подстановки  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{pmatrix}$  рассчитываются значения

$$D\epsilon = \sum_{j=1}^n (\epsilon_j^{(1)} - \epsilon_{j,k_j}^{(1-2)})^2.$$

Из множества всех подстановок выбираем подстановку  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ kt_1 & kt_2 & \dots & kt_n \end{pmatrix}$  с наименьшим значением  $D\epsilon$ . Соответствующую ей комбинацию точек принимаем за множество истинных пересечений.

### Известный алгоритм и моделирование

Новые алгоритмы МП-В и МП-У сравнивались с известным алгоритмом (ИА) [4]. В известном алгоритме отождествление пеленгов производится по правилу:  $|\Delta Y_{jk}| = |Y_{jk}^{(1)} - Y_{jk}^{(2)}| \leq \mu \cdot \sigma_{\Delta Y_{jk}}$  (для истинных пересечений) и  $|\Delta Y_{jk}| > \mu \cdot \sigma_{\Delta Y_{jk}}$  (для ложных пересечений), коэффициент  $\mu$  по умолчанию имел значение 3.

При достаточно плотном расположении ПАП, после проведенных сравнений, в предварительной матрице соответствия может оказаться слишком много единиц, т.е. необходимо однозначно связать пеленг от РЛС-1 и пеленг от РЛС-2. В работе [4] об этом ничего не сказано. Поэтому добавляем в известный алгоритм правило «северо-западного» угла, где в конечной матрице соответствия оставляем единицы, начиная сверху и слева.

Для проверки эффективности проведено моделирование алгоритмов МП-В, МП-У и ИА. Условия моделирования:

- координаты РЛС-1:  $X_{rdr1} = 0, Y_{rdr1} = 0, Z_{rdr1} = 0$ ;
- координаты РЛС-2:  $X_{rdr2} = 0, Y_{rdr2} = 0, Z_{rdr2} = 50000$  м;
- среднеквадратические ошибки измерения азимута и угла места на РЛС-1 и на РЛС-2 равны  $0,25^\circ$ ;
- проводилось по 500 экспериментов каждого варианта построения целей;
- количество целей 5;
- количество вариантов построения целей 3: «фронт»; «колонна»; «область».

Вид построения «фронт» приведен на рис. 3, вид построения «колонна» приведен на рис. 4. При этих построениях координата  $Y$  первой цели составляет 10000 м, высота каждой следующей изменяется на  $\Delta Y$  относительно предыдущей. Расстояние между целями в плоскости  $X-Z$  5000 м.

При построении «область» цели распределены равномерно в заданной трехмерной области случайным образом. Вид области пространства приведен на рис. 5. Нижняя граница области 0 м; верхняя граница области 25000 м.

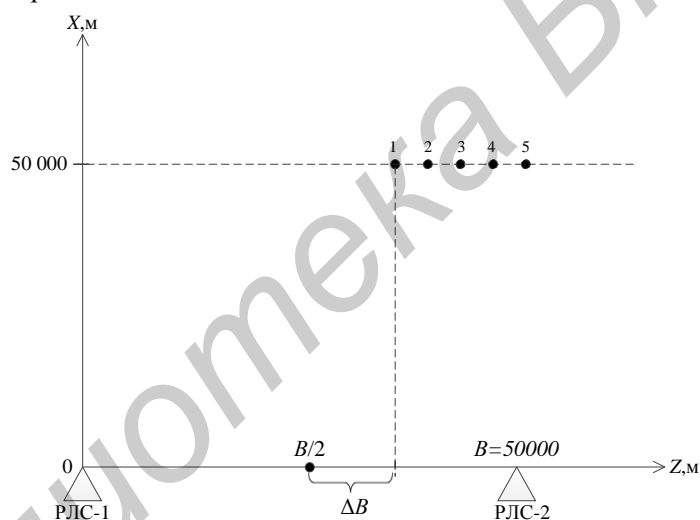


Рис. 3. Вид построения «фронт»

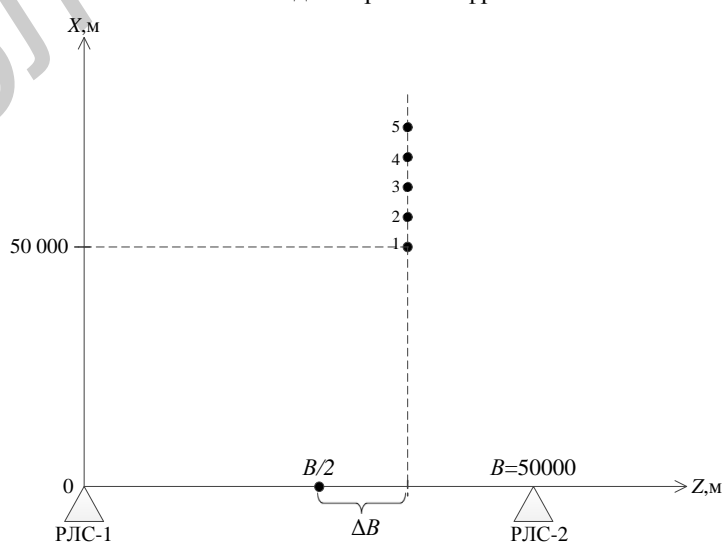


Рис. 4. Вид построения «колонна»

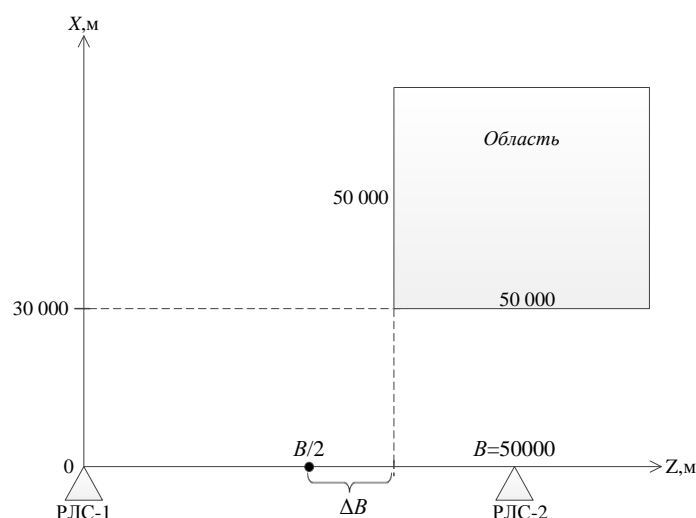


Рис. 5. Вид области пространства

При моделировании порядок поступления пеленгов от РЛС-1 был случайный, чтобы исключить «подсказку» для ИА. В качестве критерия эффективности алгоритмов использовалась вероятность правильного решения задачи – вероятность определения истинных пересечений пеленгов  $P_t$ .

### Результаты моделирования

Результаты моделирования для всех трех алгоритмов для общего случая – смещения построения относительно середины базы, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования для общего случая

$P_t$				
Построение		Фронт	Колонна	Область
$\Delta B$ , м		5000	5000	5000
$\Delta Y$ , м		-500	-500	-
Алгоритм	МП-В	0,87	0,57	0,3
	МП-У	0,465	0,99	0,88
	ИА	0,13	0,56	0,61

Результаты моделирования для всех трех алгоритмов для вырожденного случая – построения у середины базы, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты моделирования для вырожденного случая

$P_t$				
Построение		Фронт	Колонна	Область
$\Delta B$ , м		-10000	0	-25000
$\Delta Y$ , м		-500	500	-
Алгоритм	МП-В	0,90	0	0,186
	МП-У	0,50	0,268	0,890
	ИА	0,01	0,013	0,765

### Обсуждение результатов моделирования

Алгоритм МП-В обеспечивает очень высокую эффективность для построения «фронт», для общего и вырожденного случая. Для «колонны» и «области» его эффективность резко снижается. МП-В эффективно работает для «фронта», где цели находятся в достаточно узком слое по высоте.

Алгоритм МП-У удовлетворительно работает практически для всех построений. Даже для построения «колонна» на середине базы обеспечивается практически приемлемая вероятность (0,268) правильного решения задачи.

По эффективности ИА уступает МП-У во всех случаях, и уступает МП-В для построения «фронт».

Недостатком МП, очевидно, является большой объем вычислений. Т.к. количество подстановок растет как  $n!$ , то при значении  $n > 8 \dots 10$ , задача уже не может решаться на современной персональной ЭВМ в реальном времени. Но расчет легко ускоряется путем его распараллеливания.

### **Выводы**

Предложенный новый алгоритм по методу подстановок с использованием угла МП-У обеспечивает достаточно эффективную селекцию истинных пересечений при решении задачи триангуляции ПАП. Метод подстановки с использованием высоты МП-В может быть использован как вспомогательный для случая построения ПАП типа «фронт».

## **TRUE CROSSING SELECTION OF BEARINGS BY REPLACEMENT METHOD IN TRIANGULATION TASK SOLUTION**

U.A. APAROVICH, A.I. MINAU, T.U. PRAKOFYEVA

### **Abstract**

Now, the problem of true crossing selection of bearing of active jammers has not satisfying solution. New algorithm with using the replacement method is proposed here. Simulation shows the essential advantages of this method in comparison with known algorithms.

*Keywords:* jammers, triangulation, true crossing selection, replacement method.

### **Список литературы**

1. *Blackman S., Popoli R.* Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston, London, 1999.
2. *Хохлов Э.Н.* // Радиопромышленность. 2003. Вып. 1. С. 71–84.
3. *Апорович В.А., Прокофьева Т.В.* Тез. докл. 10-й военно-научн. конф. Минск, 9–10 апреля 2009. С. 150.
4. *Дрогалин В.В., Канащенков А.И., Меркулов В.И.* // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2003. № 5–6. С. 4–8.