

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

**ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:  
ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ, ИННОВАЦИИ  
(ИКТ-2018)**

Электронный сборник статей

I Международной научно-практической конференции,  
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 14–15 июня 2018 г.)

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2018

**Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018)** [Электронный ресурс] : электронный сборник статей I международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоцкий государственный университет. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Представлены результаты новейших научных исследований, в области информационно-коммуникационных и интернет-технологий, а именно: методы и технологии математического и имитационного моделирования систем; автоматизация и управление производственными процессами; программная инженерия; тестирование и верификация программ; обработка сигналов, изображений и видео; защита информации и технологии информационной безопасности; электронный маркетинг; проблемы и инновационные технологии подготовки специалистов в данной области.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3201815009 от 28.03.2018.*

Компьютерный дизайн М. Э. Дистанова.

Технические редакторы: Т. А. Дарьянова, О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Д. М. Севастьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53-21-23, e-mail: irina.psu@gmail.com

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРИЕМА  
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

**А.Л. ТРОФИМЕНКОВ, канд. техн. наук А.В. ШАРАМЕТ  
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)**

В настоящее время внедрение систем навигации в различные устройства приняло всеобъемлющий характер. Приобретая навигационный приемник, потребитель получает доступ к навигационной информации, принимаемой по открытым кодам. Однако использование открытых кодов приводит к ряду недостатков, таких как невысокая точность определения местоположения, которая составляет порядка 50 м и отсутствие возможности определения своей ориентации относительно сторон света в неподвижном состоянии [1, 3].

Применение многобазовой системы приема спутниковых навигационных сигналов (СНС) позволяет повысить точность определения местоположения. Данная система включает в себя антенную структуру (АС), состоящую из набора навигационных приемников. При этом, данная АС не только принимает навигационное сообщение, но и позволяет учитывать разность фаз навигационных сигналов на входах приемников.

Особенностью многобазовой системы является использование нескольких приемных антенн, расположенных специальным образом, с учетом размеров фазометрических баз и их положения. Для определения АС применяется численный метод оптимизации антенных систем, основанный на полном переборе всех возможных положений антенных элементов при заданном их количестве и габаритном размере. Метод основан на использовании для устранения неоднозначности измерений принципа максимального правдоподобия [2].

Точность определения направления на источник сигнала зависит от размеров наибольшей базы, однако увеличение антенной базы приводит к появлению неоднозначности фазовых измерений.

Выбор структуры антенной системы зависит от границ зоны обзора  $\nu$ . Граница зоны обзора определяет максимальную по абсолютной величине значение направляющего косинуса. Интервал однозначного измерения направляющего косинуса определяется по формуле

$$\Delta \nu_{\text{одн}} = \lambda / l, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения сигнала,  $l$  – база антенной структуры.

Задание границ зоны обзора позволяет вычислить минимальную базу, при которой число полных периодов разности фаз  $k = 0$  определяется по формуле

$$l_{\text{min}} = \lambda / \Delta \nu_{\text{одн}}, \tag{2}$$

где  $\Delta \nu_{\text{одн}}$  подставляется в радианах.

Соответственно, при заданном угловом секторе  $\pm 60^\circ$  и длине волны источника сигнала  $\lambda = 19,03$  см интервал однозначного измерения направляющего косинуса  $\Delta \nu_{\text{одн}} = 1,732$  относительно нормали к антенной структуре, а  $l_{\text{min}} = 0,11$  м. Схема разнесения антенн зависит от выбранного вектора взаимно простых чисел  $\vec{e}_x$ , который определяет оптимальное расположение элементов антенной системы.

$$\vec{e}_x = \Delta V_{одн} \vec{n}_x, \tag{3}$$

где вектор фазометрических баз  $\vec{n}_x = l/\lambda$ .

Таким образом выбранный оптимальный вектор  $\vec{e}_x = (4, 6, 9)$  для 3-х базовой антенной структуры позволяет рассчитать длину каждой отдельной базы.

$$l_x = l_{min} \vec{e}_x, \tag{4}$$

где  $l_{min}$  – минимальная база, определяющая сектор однозначного измерения направляющего косинуса.

Таблица. – Размеры баз антенной структуры

$l_1, м$	$l_2, м$	$l_3, м$
0,4395	0,6592	0,9888

Антенна структура представляет собой линейную решетку, которая позволяет определить угловое положение источника излучения сигнала (рис. 1).

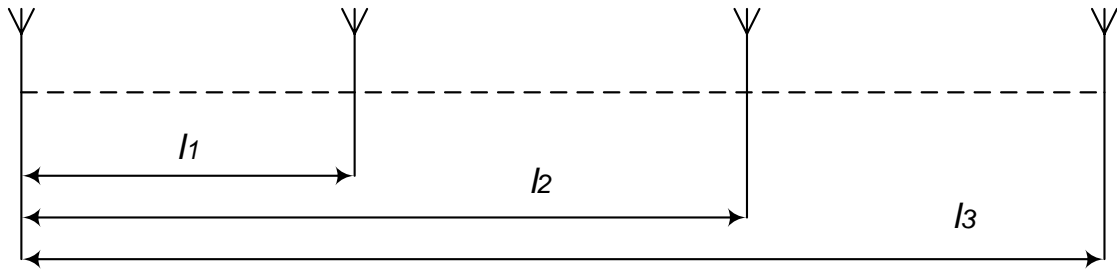


Рисунок 1. – Антенная структура системы приема СНС

Минимально возможному расстоянию между антенными элементами соответствует целое число  $e_{min} = 1$ , а связь между фазами обусловлена только за счет общего антенного элемента, так что коэффициент корреляции между ошибками измерений фаз равен 0,5. Фазовые погрешности за счет внутренних шумов приемных устройств, независимых от канала к каналу учитываются в корреляционной матрице  $B_\varphi$ :

$$B_\varphi = \sigma_\varphi^2 R_\varphi, \tag{5}$$

где  $\sigma_\varphi^2$  – дисперсия разности фаз, а нормированная корреляционная матрица  $R_\varphi$  зависит только от схемы подключения фазометров к выходам приемных устройств и имеет следующий вид [4]:

$$R_\varphi = \begin{pmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где  $a = 1, b = 0,5$

Получение статической оценки направления на источник излучения основывается на применении метода максимального правдоподобия. По формуле 7 рассчитывается вектор весов, который зависит от структуры антенной системы и корреляционной матрицы ошибок измерений.

$$\vec{q}_v = (B_\varphi^{(-1)} \vec{n}_x) / (\vec{n}_x^T B_\varphi^{(-1)} \vec{n}_x), \quad (7)$$

где  $B_\varphi^{-1}$  – матрица, обратная корреляционной матрице фазовых ошибок. Вектор весов позволяет получить оценку направляющих косинусов  $v^*$ :

$$v^* = \vec{\Phi}^T \vec{q}_v, \quad (8)$$

где  $\vec{\Phi}^T = \vec{\varphi} + \vec{k}$  – полная разность фаз.

Вектор измеренных фаз  $\vec{\varphi}$  состоит из совокупности измеренных разностей фаз на каждой базе, где значения должны быть в пределах  $[-0.5, 0.5]$ . Полные циклы фаз, утраченных при измерениях составляют вектор  $\vec{k}$ .

Задача устранения неоднозначности решается путем нахождения такого вектора  $\vec{k}^*$  из множества возможных значений данного вектора, который максимизировал бы значение функции правдоподобия.

$$\Pi_\varphi(\vec{k}_i) = (\vec{\varphi} + \vec{k}_i)^T G (\vec{\varphi} + \vec{k}_i), \quad (9)$$

Где матрица  $G$  определяется формулой

$$G = B_\varphi^{(-1)} - (B_\varphi^{(-1)} \vec{n}_x \vec{n}_x^T B_\varphi^{(-1)}) / (\vec{n}_x^T B_\varphi^{(-1)} \vec{n}_x), \quad (10)$$

Интервал однозначности направляющего косинуса позволяет рассчитать максимальные полные разности фаз на каждой базе по отдельности и тем самым ввести ограничения для максимальных значений оценочного вектора  $\vec{k}^*$ . Таким образом множество всех возможных значений векторов неоднозначностей для набора баз определяют множество векторов неоднозначностей антенной структуры, из которой необходимо определить опорную совокупность векторов неоднозначности. Указанные векторы неоднозначности  $\vec{k}_i$  должны быть линейно независимыми и иметь наименьшую величину  $d^2$ , которая ограничивает область интегрирования.

$$d^2 = \vec{k}^T G \vec{k}, \quad (11)$$

Образованная опорная совокупность векторов  $\vec{k}_i$  совместно с вектором  $\vec{e}_x$  позволяет образовать матрицу перехода к новому базису в пространстве измерений. Матрица  $C$  используется в квазиоптимальном алгоритме устранения неоднозначности. Ее детерминант по модулю должен быть равен единице, иначе опорная совокупность векторов определена неверно.

$$C = (\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{e}_x), \quad (12)$$

Искомая матрица  $C$  имеет вид:

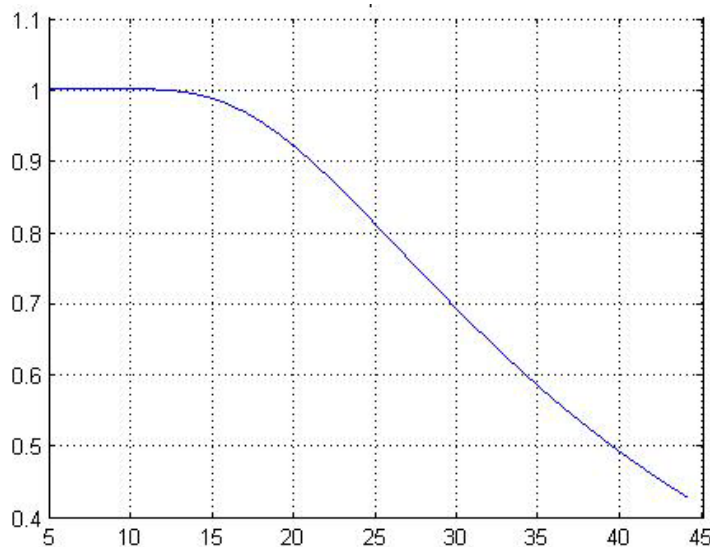
$$C = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 3 & 4 & 6 \\ 4 & 3 & 9 \end{vmatrix}, \quad (13)$$

Детерминант данной матрицы равен единице, что показывает правильность выбора опорной совокупности векторов неоднозначности.

Вероятность правильного устранения неоднозначности для трехбазовой АС, реализующей метод максимального правдоподобия сводится к вычислению двумерного нормального интеграла по формуле:

$$P_0 = \int_{-0.5d_1^2}^{0.5d_1^2} \int_{-0.5d_2^2}^{0.5d_2^2} W(y_1, y_2) dy_1 dy_2, \quad (14)$$

На рисунке 2 приведена зависимость вероятности правильного устранения неоднозначности  $P_0$  от СКО фазовых погрешностей для оптимизированной антенной структуры.



**Рисунок 2. – Зависимость вероятности  $P_0$  от СКО фазовых погрешностей**

На данном графике видно, что при СКО не более 20° вероятность правильного устранения неоднозначностей фазовых измерений превышает 0.9.

Таким образом, при построении многобазовой системы приема спутниковых навигационных сигналов выбор оптимальной антенной структуры позволит учитывать разность фаз сигнала на входах навигационных приемников и тем самым увеличить точность определения местоположения потребителя.

### Литература

1. Соловьев, Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М. : Эко-Трендз, 2000. – 268 с.
2. Белов, В.И. Теория фазовых измерительных систем / В.И. Белов. – Томск : Изд-во ТУСУРа, 1994. – 102с.
3. Карлащук, В.И. Спутниковая навигация. Методы и средства / В.И. Карлащук. – М. : СОЛОН-Пресс. – 2006. – 176 с.
4. Денисов, В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск : Изд-во ТУСУРа, 2002. – 252 с.