

# РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering

XXI век

**12 2015**

**В номере:**

## **РАДИОСИСТЕМЫ**

### **Выпуск 197**

Информационный конфликт  
в спектре электромагнитных волн, № 31

### **Выпуск 197**

Статистический синтез радиосистем, № 20



тел./факс: (495) 625-9241  
e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)  
<http://www.radiotec.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

---

## RADIOSYSTEMS: STATISTICAL SYNTHESIS OF RADIOSYSTEMS

(Journal in Journal. Editor-in-Chief – Dr. Sci. (Eng) A. I. Perov)

### Methods of synthesis and algorithms of optimal signal processing in satellite navigation

GNSS signal reception characteristics in non-gaussian jammers environment  
Efimenko V.S., Kharisov V.N., Voronchikhin D.N. 100

### Analysis of signal processing algorithms in satellite navigation

Generalized geometrical factor in radionavigation systems with pseudosatellites  
Perov A.I., Ustinov A.Yu. 110

Digital simulator of GPS signals  
Kharisov V.N., Gavrilov A.I., Golovin P.M., Medvedev P.V., Pavlov V.S. 115

Comparative analysis of algorithms for tracking pilot component of the L1OC GLONASS signal  
Perov A.I., Zakharova E.V. 122

Experimental study of search characteristics of navigation radio signals with BOC-modulation  
Boldenkov E.N., Lipa I.V., Dneprov D.V. 128

Analysis of angular discriminator in one-stage GNSS-based attitude determination  
Dneprov V.V., Korogodin I.V. 138

Efficiency analysis of joint tracking algorithms for the pilot component of L1OC GLONASS signal  
Perov A.I., Ippolitov S.P. 146

---

## MATHEMATICAL METHODS IN RADIO ENGINEERING

Linear blur  
Bogoslovsky A.V., Bogoslovsky E.A., Zhigulina I.V., Vasilyev V.V., Ponomarev A.V. 153

---

## OPTOELECTRONICS AND ACOUSTOELECTRONICS

Analysis of quality factor of collinear anisotropic diffraction of light on the elastic waves in LiNbO<sub>3</sub>-crystals  
Golubeva A.A., Ushakov N.M. 161

---

## INFORMATION TECHNOLOGIES, RADIO ENGINEERING CIRCUITS AND CIRCUIT-ELEMENT BASE

Detection and localization of text shapes in images  
Korennoi A.V., Yudakov D.S. 168

Radiotekhnika" (Radioengineering) is the leading scientific and technical journal in Russia. It covers wide spectrum of problems in priority areas of the development in communication, radar, navigation, and radioelectronics. Established in 1937.

### Внимание!

Журнал «Радиотехника», начиная с № 10'2014, имеет полную английскую версию статей, с которой вы сможете ознакомиться (с июля 2015) на наших сайтах:

<http://www.radiotec.ru>

<http://www.radiotekhnika.com>

или заказать в редакции

Необходимую информацию Вы найдете на нашем сайте <http://www.radiotec.ru>

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25036 от 12 июля 2006 г.

Сдано в набор 15.10.2015. Подписано в печать 26.11.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Печ.л. 21,75. Тираж 600 экз. Изд. № 10.

ЗАО «Издательство «Радиотехника»: 107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс: (7-495)625-92-41, (7-495)625-78-72.

E-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)

Дизайн и допечатная подготовка ООО «САЙНС-ПРЕСС».

Отпечатано в ФГУП Издательство «Известия» УД ПРФ. 127254, ул. Добролюбова, д. 6.

Контактные телефоны: 650-38-80. Заказ № 6.

ISSN 0033-8486

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015 г.

Незаконное тиражирование и перевод статей, включенных в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

УДК 621.376

# Анализ углового дискриминатора в одноэтапном алгоритме определения угловой ориентации по сигналам СРНС

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

© Авторы, 2015

**В.В. Днепров** – аспирант, кафедра радиотехнических систем, «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
E-mail: vvdneprov@mail.ru

**И.В. Корогодин** – к.т.н., доцент, кафедра радиотехнических систем,  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
E-mail: korogodin@srns.ru

Изложен алгоритм определения угловой ориентации по сигналам спутниковых радионавигационных систем для произвольного числа приемных точек и принимаемых сигналов. Для входящего в состав алгоритма дискриминатора получена дискриминационная характеристика, ее апертюра и крутизна. Приведены результаты моделирования, подтверждающие аналитические расчеты.

**Ключевые слова:** спутниковые радионавигационные системы, ГЛОНАСС, GPS, угломерная аппаратура потребителей, одноэтапный алгоритм.

The article describes a vector angular discriminator in a one-stage GNSS-based attitude determination system. Equations that allow calculating the discriminator in the general case, i.e. when receiving an arbitrary number of signals with an arbitrary number of antennas, are given. Equations for S-curve, its slope and aperture are also provided. It is shown that the angular discriminator consists of a sum of single discriminators. Each single discriminator processes one signal of one receiving antenna each. Results of computer simulation are given to verify theoretical results.

**Keywords:** global navigation satellite system, GLONASS, GPS, attitude determination, one stage algorithm, phase measurements, S-curve.

Навигационная аппаратура потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) находит множество применений. Так известно [1], что с помощью СРНС можно определять угловую ориентацию объекта. Для этого используются относительные измерения фаз сигналов, принимаемых несколькими разнесенными антеннами. Как правило, задача определения ориентации решается в два этапа [1, 2]. На первом этапе определяются разности фаз, разрешается фазовая неоднозначность. На втором этапе производится расчет параметров, характеризующих ориентацию антенн относительно опорной системы координат. В работе [3] предложен одноэтапный алгоритм, непосредственно формирующий оценки углов ориентации по сигналам трех разнесенных антенн. Одноэтапная обработка сигналов позволяет повысить точность и помехоустойчивость аппаратуры по сравнению с аппаратурой с двухэтапной обработкой [1].

Цель работы – обобщение алгоритма, приведенного в [3], на произвольное число приемных точек и анализ характеристик дискриминаторов углов, входящих в состав системы.

## Постановка задачи

Под углами ориентации объекта будем понимать углы Эйлера: угол крена  $r$  (roll), угол тангажа  $p$  (pitch), угол рыскания  $y$  (yaw). Объединим их в вектор  $\alpha = [r \ p \ y]^T$ . Эти углы характеризуют взаимную ориентацию связанной с объектом системы координат (ССК или PRY) и некоторой опорной системы координат (ОСК), например, топоцентрической системы координат (ТЦСК или NED) (рис. 1).

Пусть на объекте размещено  $M$  приемных антенн, первая из которых находится в начале ССК. Координаты остальных приемных точек в ССК известны и зада-

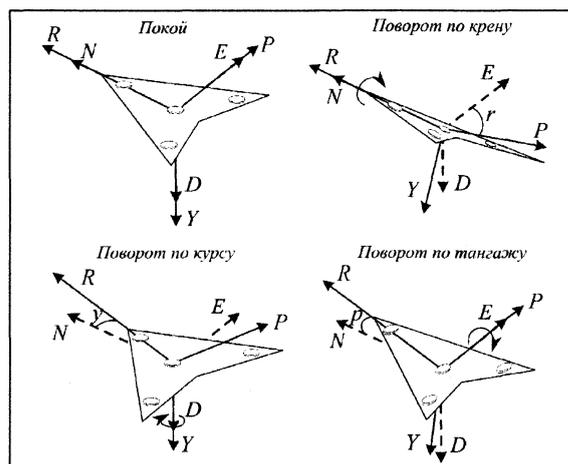


Рис. 1. Ориентации углов крена, тангажа и рыскания

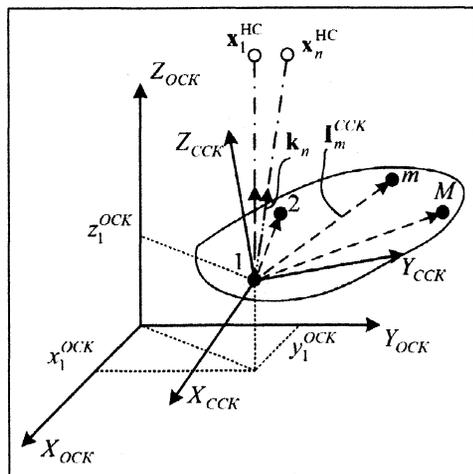


Рис. 2. Геометрия задачи

ются радиус-векторами  $\mathbf{I}_m^{\text{CCK}}$ ,  $m = \overline{2, M}$  (рис. 2). Радиус-векторы  $\mathbf{I}_m^{\text{CCK}}$ ,  $m = \overline{2, M}$  задают базы угломерного устройства.

Каждая антенна принимает радиосигналы  $N$  навигационных спутников (НС). Опишем направление на каждый спутник в ОСК через вектор направляющих косинусов

$$\mathbf{k}_n = \begin{bmatrix} k_{x,n} & k_{y,n} & k_{z,n} \end{bmatrix}^T, \quad n = \overline{1, N} :$$

$$k_{x,n} = \frac{x_n - x}{R_n}, \quad k_{y,n} = \frac{y_n - y}{R_n}, \quad k_{z,n} = \frac{z_n - z}{R_n}, \quad (1)$$

где  $x_n, y_n, z_n$  – координаты  $n$ -го спутника;  $R_n$  – дальность до  $n$ -го спутника;  $x, y, z$  – координаты объекта в ОСК.

Координаты радиус-векторов приемных точек из ССК пересчитываются в ОСК при помощи матрицы преобразования координат  $\mathbf{I}_m^{\text{OCK}}(\mathbf{a}) = \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OCK}}(\mathbf{a}) \mathbf{I}_m^{\text{CCK}}$ ,  $m = \overline{2, M}$ , где  $\mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OCK}}(\mathbf{a})$  определяется как

$$\mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OCK}}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} \cos(y) & -\sin(y) & 0 \\ \sin(y) & \cos(y) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(p) & 0 & \sin(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(p) & 0 & \cos(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r) & -\sin(r) \\ 0 & \sin(r) & \cos(r) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из-за пространственного разнесения антенн радионавигационные сигналы в приемных точках  $2 \dots M$  имеют фазовый сдвиг относительно первой приемной антенны, равный

$$\psi_{m,n}(\mathbf{a}) = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OCK}}(\mathbf{a}) \mathbf{I}_m^{\text{CCK}} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{I}_m^{\text{OCK}}(\mathbf{a}), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны навигационного радиосигнала.

Модель радиосигнала  $n$ -го НС для  $m$ -й антенны запишем в виде [1]

$$S_{m,n}(t_{k,l}) = A h_{\text{дк},n}(t_{k,l} - \tau_{m,n}) \cos \left( \omega_{0,n} t_{k,l} + \int_{t_0}^t (\omega_{\text{д},n} + \omega_{\psi,m,n}) dt + \pi \theta_{\text{НС},n} + \varphi_{0,n} + \psi_{m,n}(\mathbf{a}_k) \right), \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала;  $\omega_0$  – несущая частота сигнала;  $h_{\text{дк}}(t)$  – функция модуляции дальномерным кодом;  $\omega_{\text{д}}$  – доплеровская частота сигнала, обусловленная поступательным движением НАП-НС;  $\theta_{\text{НС}}$  – символ навигационного сообщения;  $\varphi_0$  – начальная фаза сигнала;  $\omega_{\psi}$  – доплеровский сдвиг частоты, обусловленный вращательным движением;  $t_{k,l} = t_k + lT_d$ ,  $t_k = t_{k-1} + T$ ,  $T = LT_d$ .

Изменение углов ориентации  $\mathbf{a}$  описывается диффузионным дискретным марковским случайным процессом

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{G} \xi_{\alpha,k-1}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \xi_{\alpha} \sim N(0, \mathbf{D}_{\xi}), \quad (5)$$

где вектор состояния имеет вид

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_k \\ \mathbf{v}_{\alpha,k} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Сигналы навигационных спутников наблюдаются на фоне аддитивных дискретных белых гауссовских шумов (АДБГШ)

$$\xi_{k,l} = S_{m,n}(t_{k,l}) + n_{k,l}. \quad (7)$$

Найдем квазиоптимальную по критерию минимума среднеквадратической ошибки оценивания системе фильтрации вектора  $\mathbf{a}(t)$  по наблюдениям (7) и проведем анализ ее дискриминаторов.

### Алгоритм фильтрации углов

Уравнения квазиоптимальной (в гауссовском приближении) фильтрации вектора состояния для дискретного времени [3] имеют следующий вид:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \tilde{\mathbf{X}}_k + \mathbf{D}_{\mathbf{X},k} \left( \frac{\partial F_k(\tilde{\mathbf{X}}_k)}{\partial \mathbf{X}} \right)^T, \quad \tilde{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{X},k} = \mathbf{F} \mathbf{D}_{\mathbf{X},k-1} \mathbf{F}^T + \mathbf{G} \mathbf{D}_\xi \mathbf{G}^T, \quad \mathbf{D}_{\mathbf{X},k}^{-1} = \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{X},k}^{-1} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \left( \frac{\partial F_k(\tilde{\mathbf{X}}_k)}{\partial \mathbf{X}} \right)^T, \quad (9)$$

где  $\hat{\mathbf{X}}_k$  – оценка вектора состояния;  $\tilde{\mathbf{X}}_k$  – экстраполяция вектора состояния;  $\mathbf{D}_{\mathbf{X},k}$  – матрица дисперсий ошибок фильтрации;  $\tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{X},k}$  – матрица дисперсий ошибок экстраполяции;  $F_k(\tilde{\mathbf{X}}_k)$  – логарифм функции правдоподобия обрабатываемых наблюдений.

Введем вектор разностей фаз

$$\boldsymbol{\Psi} = \left| \psi_{2,1} \quad \dots \quad \psi_{2,N} \quad \dots \quad \psi_{M,1} \quad \dots \quad \psi_{M,N} \right|^T = \left| \boldsymbol{\psi}_2^T \quad \dots \quad \boldsymbol{\psi}_M^T \right|^T. \quad (10)$$

Введем матрицу  $\mathbf{c}$ , такую, что  $\mathbf{a} = \mathbf{c}\mathbf{X}$ . Рассмотрим производную  $\frac{\partial F_k(\tilde{\mathbf{X}})}{\partial \mathbf{X}}$ , определяющую угловой дискриминатор:

$$\frac{\partial F_k(\tilde{\mathbf{X}}_k)}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial F_k(\boldsymbol{\Psi}(\tilde{\mathbf{a}}_k))}{\partial \boldsymbol{\Psi}} \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}(\tilde{\mathbf{a}}_k)}{\partial \mathbf{a}} \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial F_k(\boldsymbol{\Psi}(\tilde{\mathbf{a}}_k))}{\partial \boldsymbol{\Psi}} \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}(\tilde{\mathbf{a}}_k)}{\partial \mathbf{a}} \mathbf{c}. \quad (11)$$

Первый сомножитель в (11) определяет вектор дискриминаторов разностей фаз (ДРФ) (10) по сигналам всех видимых НС. Синтез и анализ ДРФ проведен, например, в [5]:

$$\mathbf{u}_{\boldsymbol{\Psi},k} = \left\{ \frac{\partial F_k[\boldsymbol{\Psi}(\tilde{\mathbf{a}}_k)]}{\partial \boldsymbol{\Psi}} \right\}^T. \quad (12)$$

Второй сомножитель  $\frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \mathbf{a}}$  запишем в виде блочной матрицы

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\psi}_2}{\partial \mathbf{a}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \boldsymbol{\psi}_M}{\partial \mathbf{a}} \end{pmatrix}, \quad \text{где} \quad \frac{\partial \boldsymbol{\psi}_2}{\partial \mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_{2,1}}{\partial \mathbf{a}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_{2,N}}{\partial \mathbf{a}} \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \boldsymbol{\psi}_M}{\partial \mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_{M,1}}{\partial \mathbf{a}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_{M,N}}{\partial \mathbf{a}} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Рассмотрим производную разности фаз (3) по вектору углов ориентации

$$\frac{\partial \psi_{m,n}(\boldsymbol{\alpha})}{\partial \boldsymbol{\alpha}} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\alpha}} \mathbf{U}_{\text{ССК}}^{\text{ОСК}}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{I}_m^{\text{ССК}}. \quad (14)$$

Введем матрицу  $\mathbf{M}$  (размером  $N \times 3$ ) направляющих косинусов

$$\mathbf{M} = \left| \mathbf{k}_1^T \quad \mathbf{k}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{k}_N^T \right|^T. \quad (15)$$

Тогда с учетом (14) и (15) производную (13) можно записать как

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \alpha} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{vmatrix} \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OСК}}(\alpha) \mathbf{I}_2^{\text{CCK}} \\ \dots \\ \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OСК}}(\alpha) \mathbf{I}_M^{\text{CCK}} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

С учетом (12) и (16) имеем

$$\left( \frac{\partial F_k(\tilde{\mathbf{X}}_k)}{\partial \mathbf{X}} \right)^T = \mathbf{c}^T \mathbf{u}_{\alpha,k}, \quad (17)$$

где  $\mathbf{u}_{\alpha,k}$  – дискриминатор углов ориентации для  $M$  приемных точек при приеме сигналов  $N$  спутников:

$$\mathbf{u}_{\alpha,k} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{vmatrix} \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \mathbf{I}_2^{\text{CCK}} \\ \dots \\ \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \mathbf{I}_M^{\text{CCK}} \end{vmatrix}^T \mathbf{u}_{\psi,k}. \quad (18)$$

Аналогичное выражение для трех приемных точек получено в [3].

### Анализ углового дискриминатора

Рассмотрим подробнее множители выражения (18). Вектор дискриминаторов разностей фаз содержит компоненты для каждой базы и каждого спутника:

$$\mathbf{u}_{\psi} = |u_{\psi 2,1} \ \dots \ u_{\psi 2,N} \ \dots \ u_{\psi M,1} \ \dots \ u_{\psi M,N}|^T. \quad (19)$$

Рассмотрим  $m$ -ю строку  $\mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{U}_{\text{CCK}}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \mathbf{I}_m^{\text{CCK}} = \mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha})$  второго сомножителя в (18):

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial r} I_{m,x}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial p} I_{m,x}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial y} I_{m,x}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \\ \frac{\partial}{\partial r} I_{m,y}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial p} I_{m,y}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial y} I_{m,y}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \\ \frac{\partial}{\partial r} I_{m,z}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial p} I_{m,z}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \frac{\partial}{\partial y} I_{m,z}^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Произведение  $\mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha})$  вычисляется по формуле

$$\mathbf{M} \frac{\partial}{\partial \alpha} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) = \begin{vmatrix} \mathbf{k}_1^T \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \mathbf{k}_1^T \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \mathbf{k}_1^T \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{k}_N^T \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \mathbf{k}_N^T \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) & \mathbf{k}_N^T \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}_m^{\text{OСК}}(\tilde{\alpha}) \end{vmatrix}. \quad (21)$$

В каждом столбце матрицы (21) рассчитывается значение частной производной радиус-вектора антенны  $\mathbf{I}_m^{\text{OСК}}$  по одному из углов ориентации в точке экстраполяции, формируемой следящей системой. Запишем выражения для производных по углу крена, тангажа и рыскания:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\mathbf{a}}) &= \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{I}_m^{\text{ОСК}}(\tilde{\mathbf{a}}) = \begin{vmatrix} (-SySr - CySpCr)I_Y^{\text{ОСК}} - (SyCr - CySpSr)I_Z^{\text{ОСК}} \\ (CySr - SySpCr)I_Y^{\text{ОСК}} + (CyCr + SySpSr)I_Z^{\text{ОСК}} \\ -CpCrI_Y^{\text{ОСК}} + CpSrI_Z^{\text{ОСК}} \end{vmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\mathbf{a}}) &= \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{I}_m^{\text{ОСК}}(\tilde{\mathbf{a}}) = \begin{vmatrix} -CySpI_X^{\text{ОСК}} + CyCpSrI_Y^{\text{ОСК}} + CyCpCrI_Z^{\text{ОСК}} \\ -SySpI_X^{\text{ОСК}} + SyCpSrI_Y^{\text{ОСК}} + SyCpCrI_Z^{\text{ОСК}} \\ -CpI_X^{\text{ОСК}} - SpSrI_Y^{\text{ОСК}} - SpCrI_Z^{\text{ОСК}} \end{vmatrix}, \\
 \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\mathbf{a}}) &= \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}_m^{\text{ОСК}}(\tilde{\mathbf{a}}) = \begin{vmatrix} -SyCpI_X^{\text{ОСК}} - (CyCr + SySpSr)I_Y^{\text{ОСК}} + (CySr - SySpCr)I_Z^{\text{ОСК}} \\ CyCpI_X^{\text{ОСК}} - (SyCr - CySpSr)I_Y^{\text{ОСК}} + (SySr - CySpCr)I_Z^{\text{ОСК}} \\ 0 \end{vmatrix},
 \end{aligned} \tag{22}$$

где обозначено  $Cy = \cos(\tilde{y})$ ,  $Sy = \sin(\tilde{y})$ ,  $Cp = \cos(\tilde{p})$ ,  $Sp = \sin(\tilde{p})$ ,  $Cr = \cos(\tilde{r})$ ,  $Sr = \sin(\tilde{r})$ .

Подставим (19), (21), (22) в выражение (18), определяющее векторный угловой дискриминатор, и выполним транспонирование:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_{a,k} &= \frac{2\pi}{\lambda} \begin{vmatrix} \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{r,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{r,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{r,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{r,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \\ \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{p,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{p,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{p,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{p,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \\ \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{y,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{y,2}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_1^T \mathbf{L}_{y,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \dots \mathbf{k}_N^T \mathbf{L}_{y,M}(\tilde{\mathbf{a}}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_{\psi,2,1} \\ \vdots \\ u_{\psi,2,N} \\ \vdots \\ u_{\psi,M,N} \end{vmatrix} = \\
 &= \begin{vmatrix} \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n} \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n} \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{r,m,n} \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{p,m,n} \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{y,m,n} \end{vmatrix},
 \end{aligned} \tag{23}$$

где

$$u_{r,m,n} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \quad u_{p,m,n} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \quad u_{y,m,n} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n} \tag{24}$$

– дискриминаторы углов крена, тангажа и рыскания соответственно для сигнала  $n$ -го спутника на  $m$ -й базе.

Таким образом, одноэтапный алгоритм фильтрации угловой ориентации использует три дискриминатора – крена, тангажа и рыскания. Каждый из них является суммой частных дискриминаторов соответствующих углов для каждой базы и каждого спутника:

$$\begin{aligned}
 u_r &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{r,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \\
 u_p &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{p,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}, \\
 u_y &= \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N u_{y,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\mathbf{a}}) u_{\psi,m,n}.
 \end{aligned} \tag{25}$$

Выражения (25) могут быть легко обобщены на случай сигналов с частотным разделением или сигналов различных частотных диапазонов – достаточно произвести замену  $\lambda \rightarrow \lambda_n$ .

### Дискриминационная характеристика углового дискриминатора

При анализе помехоустойчивости и реализации следящих систем в НАП требуется знать такие характеристики дискриминаторов, как апертуру дискриминационной характеристики (ДХ) и крутизну дискриминационной характеристики (ДХ) [4].

Рассмотрим дискриминационную характеристику углового дискриминатора (23)

$$U_{\alpha}(\alpha; \tilde{\alpha}) = E[\mathbf{u}_{\alpha,k}] = \begin{bmatrix} \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N E[u_{r,m,n}] \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N E[u_{p,m,n}] \\ \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N E[u_{y,m,n}] \end{bmatrix}, \quad (26)$$

где символом  $E[\ ]$  обозначена операция взятия математического ожидания.

Общая дискриминационная характеристика для дискриминатора угла крена, тангажа или рыскания является суммой дискриминационных характеристик частных дискриминаторов (24).

Например, для ДХ частных дискриминаторов угла крена (roll)

$$U_{r,m,n}(r; \tilde{\alpha}) = E[v_{r,m,n}] = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) E[u_{\psi,m,n}] = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \sin(\psi_{m,n}(r, \tilde{p}, \tilde{y}) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})), \quad (27)$$

где использована ДХ дискриминатора разности фаз (ДРФ) [5]:  $E[u_{\psi,m,n}] = S_{\psi} \sin[\psi_{m,n}(\alpha) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})]$ ,  $S_{\psi} = \left(\frac{AL}{2}\right)^2$

– крутизна ДХ ДРФ;  $\psi_{m,n}(r, \tilde{p}, \tilde{y})$ ,  $\psi_{m,n}(\tilde{\alpha})$  – разности фаз, рассчитываемые по выражению (3).

ДХ для дискриминатора угла крена равна

$$U_r(r; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N U_{r,m,n}(r; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \sin[\psi_{m,n}(r, \tilde{p}, \tilde{y}) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})]. \quad (28)$$

Аналогично получаем ДХ для дискриминаторов угла тангажа и рыскания соответственно:

$$U_p(p; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N U_{p,m,n}(p; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \sin[\psi_{m,n}(\tilde{r}, p, \tilde{y}) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})], \quad (29)$$

$$U_y(y; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N U_{y,m,n}(y; \tilde{\alpha}) = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \sin[\psi_{m,n}(\tilde{r}, \tilde{p}, y) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})]. \quad (30)$$

### Крутизна дискриминационной характеристики

Крутизна дискриминационной характеристики определяется как сумма отдельных крутизн для ДХ частных дискриминаторов для  $m$ -й приемной антенны и  $n$ -го спутника. Крутизну дискриминационной характеристики (27) можно представить в виде

$$S_{r,m,n} = \frac{\partial}{\partial r} U_{r,m,n}(r; \tilde{\alpha}) \Big|_{r=\tilde{r}} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha}) S_{\psi} \frac{\partial}{\partial r} \sin[\psi_{m,n}(r, \tilde{p}, \tilde{y}) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})] = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 S_{\psi} \left(\mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha})\right)^2. \quad (31)$$

Тогда крутизна ДХ (28) будет вычисляться как

$$S_r = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N S_{r,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 S_{\psi} \left(\mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{r,m}(\tilde{\alpha})\right)^2. \quad (32)$$

Аналогично получают выражения для крутизны ДХ дискриминатора тангажа и рыскания:

$$S_p = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N S_{p,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 S_\psi \left( \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{p,m}(\tilde{\alpha}) \right)^2, \quad S_y = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N S_{y,m,n} = \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 S_\psi \left( \mathbf{k}_n^T \mathbf{L}_{y,m}(\tilde{\alpha}) \right)^2. \quad (33)$$

Покажем, что с возрастанием крутизны частного дискриминатора уменьшается дисперсия его эквивалентных наблюдений. Воспользуемся статистическим эквивалентом ДРФ [5]

$$u_{\psi,m,n} = S_\psi \left\{ \sin \left[ \psi_{m,n}(\alpha) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha}) \right] + n_\psi \right\}, \quad (34)$$

где  $n_\psi \sim N \left[ 0, \frac{1}{q_{c/n0} T} \left( 1 + \frac{1}{2q_{c/n0} T} \right) \right]$  – шумы эквивалентных наблюдений разности фаз;  $q_{c/n0}$  – отношение сигнал/шум. Тогда выражение для любого из частных дискриминаторов (24) представляется в виде

$$u_{\alpha,m,n} = \sqrt{S_\alpha S_\psi} \sin(\psi_{m,n}(\alpha) - \psi_{m,n}(\tilde{\alpha})) + \sqrt{S_\alpha S_\psi} n_{\psi,m,n}, \quad (35)$$

откуда шумы эквивалентных наблюдений угла ориентации

$$n_{\alpha,m,n} = \frac{\sqrt{S_\alpha S_\psi} n_{\psi,m,n}}{S_\alpha} = \sqrt{\frac{S_\psi}{S_\alpha}} n_{\psi,m,n} \quad (36)$$

имеют дисперсию, обратно пропорциональную крутизне частного дискриминатора

$$D_{\alpha,m,n} = \frac{S_\psi}{S_\alpha} \frac{1}{q_{c/n0} T} \left( 1 + \frac{1}{2q_{c/n0} T} \right). \quad (37)$$

Шумы наблюдений общих дискриминаторов углов (25) образуются как взвешенная сумма коррелированных между собой наблюдений (36).

### Результаты моделирования

Вначале для простоты и наглядности рассмотрим «плоскую» задачу, когда одна базовая линия вращается в плоскости NOD (изменяется только угол тангажа), и в той же плоскости лежит линия визирования единственного спутника. Расстояние между антеннами 1,5 м, длина волны  $\lambda \approx 19$  см. В таком случае характеристики дискриминатора определяются углом между радиус-вектором базовой линии и линией визирования на спутник. На рис. 3 представлены ДХ и прямые вида  $y = S_d(p - \tilde{p})$  для нескольких значений этого угла. Отметим, что различное взаимное расположение базовой линии и НС приводит к разной апертуре и крутизне ДХ. Так, когда базовая линия и линия визирования НС практически коллинеарны, крутизна ДХ стремится к нулю – малое изменение ориентации практически не находит отклика в изменении разности фаз. Следовательно, вклад такого частного дискриминатора в общую сумму будет наименьшим, а шумы его эквивалентных наблюдений – максимальны.

Проведено статистическое моделирование, подтверждающее верность полученных выражений для ДХ (28), (29), (30) и крутизны (32), (33) (рис. 4).

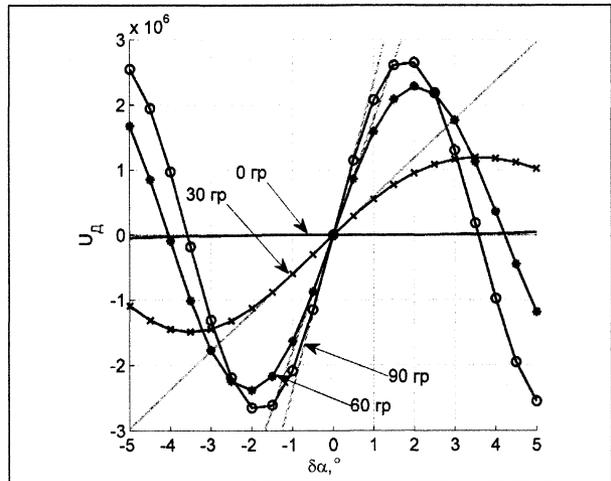


Рис. 3. Графическое представление дискриминационных характеристик для нескольких значений угла тангажа

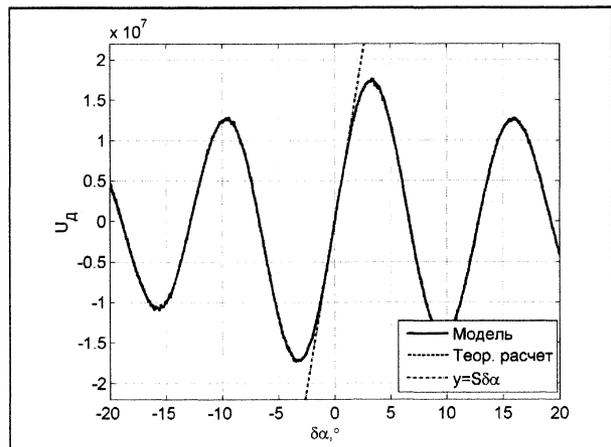


Рис. 4. Графическое представление дискриминационной характеристики, полученной в результате статистического моделирования

В общем случае характеристики углового дискриминатора зависят от взаимного расположения приемных антенн, НС и ОСК. Выражение для ДХ частного дискриминатора (24) было рассчитано на ПК для большого числа (10000) всевозможных случайных ориентаций базовой линии в трехмерном пространстве. Орт направления на спутник при этом фиксирован. Длина волны  $\lambda \approx 19$  см. На рис. 5 на один график нанесены нормированные на крутизну ДХ для длины базовой линии 1 м и 2 м соответственно. Более темный цвет соответствует большей плотности реализаций. На рис. 6 приведены совместные распределения крутизны ДХ и ширины их апертур. В большинстве случаев большая крутизна соответствует меньшей апертуре дискриминационной характеристики.

Полный дискриминатор угла ориентации является суммой отдельных частных дискриминаторов. В типичных практических приложениях можно ожидать сложения нескольких десятков частных дискриминаторов, при этом основной вклад будут вносить дискриминаторы с большей крутизной. Как следует из распределений на рис. 6, большой крутизне соответствуют апертуры шириной  $10 \dots 30^\circ$  при длине базы 1 м и  $5 \dots 15^\circ$  при длине базы 2 м, которые и определяет ширину апертуры полного дискриминатора.

На рис. 7 нанесены нормированные на крутизну ДХ полного дискриминатора угла тангажа для 10000 всевозможных случайных ориентаций антенной системы из трех антенн. Антенны расположены в вершинах правильного треугольника с длиной ребра 1 м. Принимаются сигналы восьми видимых НС. Взаимное распределение крутизны и ширины апертуры представлено на рис. 8, из графика следует сохранение обратного тренда между крутизной и шириной апертуры. На рис. 9 представлена гистограмма ширины апертуры ДХ. Минимальное значение ширины апертуры в выборке составляет  $13^\circ$ , максимальное  $-90^\circ$ . В интервале от  $13$  до  $32^\circ$  содержится 95% реализаций, что соответствует прогнозам, полученным выше при анализе характеристик частных дискриминаторов. При увеличении длины базы до двух метров характер зависимостей сохраняется, 95%-й реализаций ширины апертуры находится в интервале от  $7$  до  $16^\circ$ .

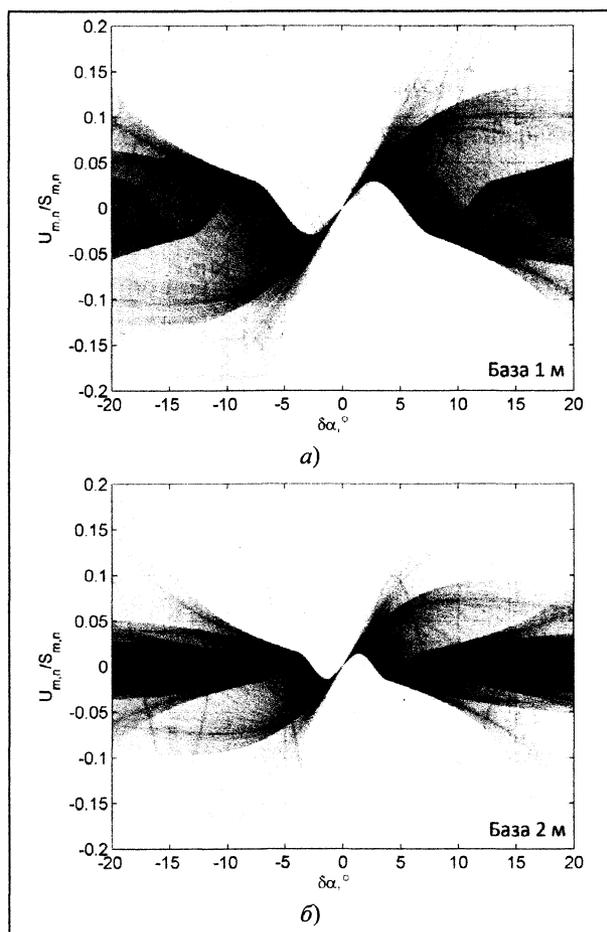


Рис. 5. ДХ для длины базовой линии 1 м (а) и 2 м (б)

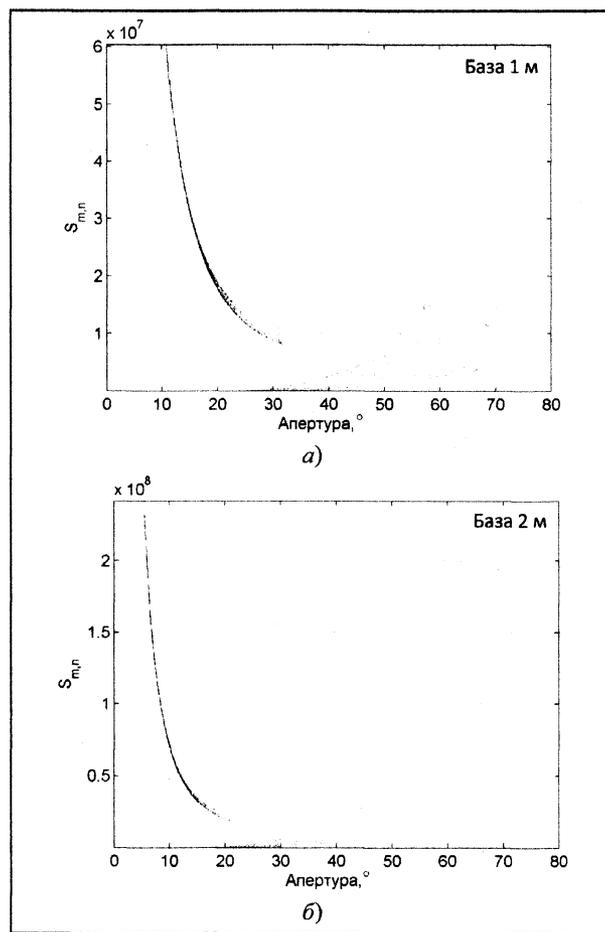


Рис. 6. Графики распределения крутизны ДХ и ширины их апертур для длины базовой линии 1 м (а) и 2 м (б)

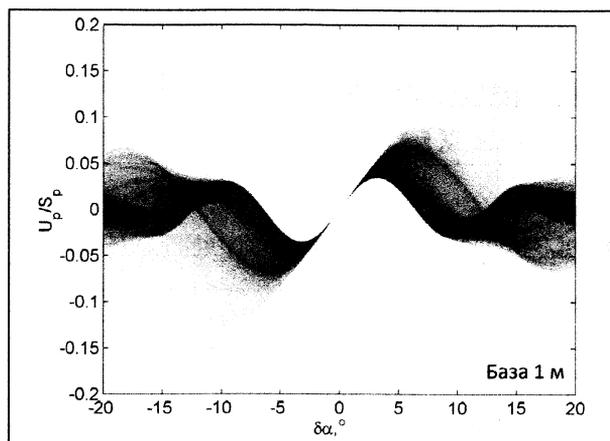


Рис. 7. ДХ полного дискриминатора угла тангажа для системы из трех антенн

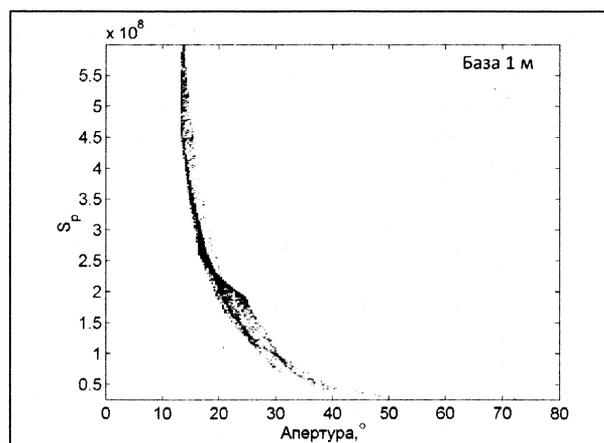


Рис. 8. Взаимное распределение крутизны и ширины апертуры

- Рассмотрен алгоритм оценивания углов ориентации объекта по сигналам СРНС и входящие в его состав дискриминаторы углов крена, тангажа и рыскания. Представлены выражения, позволяющие рассчитать отклик дискриминатора в общем случае, т.е. при приеме произвольного числа сигналов произвольным числом антенн. Получены аналитические выражения для дискриминационной характеристики и ее крутизны. Показано, что угловой дискриминатор состоит из суммы частных дискриминаторов, каждый из которых осуществляет обработку для одной базы и одного навигационного спутника. Доказана обратная зависимость между дисперсией шумов эквивалентных наблюдений углов ориентации и крутизной дискриминационной характеристики. Представлены результаты моделирования. Показано, что для трехантенной угломерной системы ширина апертуры дискриминационной характеристики в 95% случаев лежит в диапазоне от  $13^\circ$  до  $32^\circ$  при длине базы 1 м, от  $7^\circ$  до  $16^\circ$  при длине базы 2 м.

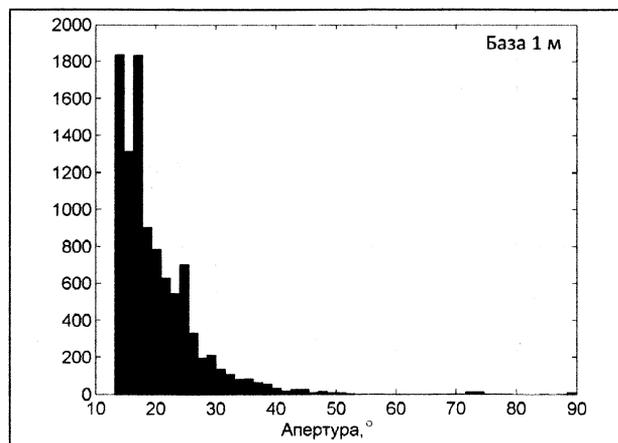


Рис. 9. Гистограмма ширины апертуры ДХ

## Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Под. ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
2. Фатеев Ю.Л. Определение пространственной ориентации объектов по сигналам радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Электронный журнал «Исследовано в России». 2004 г. 72. С. 792–801. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>.
3. Перов А.И. Одноэтапный когерентно-некогерентный алгоритм определения угловой ориентации объекта по сигналам спутниковой радионавигационной системы // Радиотехника. 2014. № 9. С. 97–105.
4. Перов А.И., Замолодчиков В.Н., Чиликин В.М. Радиоавтоматика М.: Радиотехника. 2014. 320 с.
5. Корогодин И.В., Перов А.И. Синтез и анализ дискриминаторов разностей фаз сигналов, принимаемых на множестве пространственно разнесенных точек // Радиотехника. 2010. № 7. С. 84–92.

Поступила 27 июня 2015 г.

## Analysis of angular discriminator in one-stage GNSS-based attitude determination

© Authors, 2015  
© Radiotekhnika, 2015

©Authors, 2015

**V.V. Dneprov** – Post-graduate Student, Radio System Department, «National Research University «MPEI» (Moscow)  
E-mail: vvdneprov@mail.ru

**I.V. Korogodin** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Radio System Department,  
«National Research University «MPEI» (Moscow)  
E-mail: korogodin@srns.ru

Receivers of global satellite navigation systems (GNSS) can be found in different aspects of life. GNSS signals are known to be able to provide attitude determination of an object. The task of attitude determination is often solved in two stages. Phase measurements and phase ambiguity resolution are made at first stage. The second stage is the calculation of the parameters characterizing the orientation of the antennas relative to the reference coordinate system. One-stage signal processing can improve the accuracy and interference immunity of the equipment compared to equipment with two-stage processing. The article describes the vector angular discriminator in a one-stage GNSS-based attitude determination system. Equations that allow calculating the discriminator in the general case, i.e. when receiving an arbitrary number of signals with an arbitrary number of antennas, are given. Equations for S-curve, its slope and aperture are also provided. It is shown that the angular discriminator consists of the sum of single discriminators, processing one signal of one receiving antenna each. The results of computer simulation are given to verify theoretical results.

### References

1. GLONASS. Principy' postroeniya i funkcionirovaniya. Izd. 4-e, pererab. i dop. / Pod. red. *A.I. Perova, V.N. Xarisova* M.: Radiotekhnika. 2010. 800 s.
2. *Fateev Yu.L.* Opredelenie prostranstvennoj orientaczii ob'ektov po signalam radionavigaczionny'x sistem GLONASS/GPS // *E'lektronny'j zhurnal «Issledovano v Rossii»*. 2004 g. 72. S. 792–801. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/071.pdf>.
3. *Perov A.I.* Odnoe'tapny'j kogerentno-nekogerentny'j algoritm opredeleniya uglovoj orientaczii ob'ekta po signalam sputnikovoj radionavigaczionnoj sistemy' // Radiotekhnika. 2014. № 9. S. 97–105.
4. *Perov A.I., Zamolodchikov V.N., Chilikin V.M.* Radioavtomatika M.: Radiotekhnika. 2014. 320 s.
5. *Korogodin I.V., Perov A.I.* Sintez i analiz diskriminatorov raznostej faz signalov, prinimaemy'x na mnozhestve prostranstvenno raznesenny'x toček // Radiotekhnika. 2010. № 7. S. 84–92.

## Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» Вы можете приобрести книгу



*Геденко С.В., Воробьев А.А., Дергунов И.И., Журавлева В.А., Занозин А.В., Коробейников А.Ю., Коробейников Ю.А., Михайлова Т.А., Миханов Н.П., Мокрушина И.С., Сай П.А., Сычев И.А., Цурков М.Л., Шевчук В.И., Ягольников А.С., Ягольников С.В.*

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И РАДИОКОНТРОЛЬ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Впервые дан обзор основных международных и национальных принципов управления радиочастотным спектром, принципов использования радиочастотного спектра в развитых странах, в том числе и в Российской Федерации, способов (механизмов) регулирования и управления использованием радиочастотного ресурса с учетом интересов радиоэлектронных средств, обеспечивающих обороноспособность страны, путей и методов конверсии радиочастотного спектра, проводимой в интересах расширения его использования средствами гражданского назначения.

Изложены уникальные методы решения широкого круга задач в области электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, таких как детерминированная и вероятностная оценка ЭМС РЭС и радиосистем, обоснование различного рода мероприятий, направленных на обеспечение ЭМС РЭС, радиоконтроль использования радиочастотного спектра радиоэлектронными средствами.

*Для инженеров и сотрудников научных и проектных организаций, решающих проблемы использования радиочастотного спектра и обеспечения ЭМС РЭС. Может быть полезна студентам, магистрам и аспирантам технических вузов, а также специалистам гражданских и военных радиочастотных органов.*

По вопросам заказа и приобретения книг обращаться по адресу: 107031 г. Москва, Кузнецкий мост, 20/6

Тел./факс (495) 625-92-41, тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37

Полный перечень книг, выпускаемых Издательством «Радиотехника», размещен на сайте  
<http://www.radiotec.ru>; e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)