

УДК: 621.396.96

ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНОБАЗОВОЙ МРЛС

Азизов А. Г., аспирант, E-mail: drian07@rambler.ru
Богадаров А. Ю., аспирант, E-mail: alxb@rambler.ru
Заикин Б. А., аспирант, E-mail: halfmazerkin@gmail.com
Калиниченко М. Е., аспирант, E-mail: mishka2104_90@mail.ru
Котов А. Ф., д.т.н., профессор, E-mail: kotov@mirea.ru
Попонов П. В., аспирант, E-mail: poponovpv@mail.ru
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача оценивания координат источников излучения в двухпозиционной двухканальной однобазовой радиолокационной системе. Внимание акцентировано на обработку узкополосных сигналов.

Ключевые слова: обработка узкополосных сигналов, МРЛС.

ESTIMATING COORDINATES OF RADIATION SOURCE IN SINGLE-BASE MULTI RADAR STATION

Azizov A.G., postgraduate, Email: drian07@rambler.ru
Bogadarov A. U., postgraduate, Email: alxb@rambler.ru
Zaikin B.A., postgraduate, Email: halfmazerkin@gmail.com
Kalinichenko M. E., postgraduate, Email: mishka2104_90@mail.ru
Kotov A.F., ph.d, professor, Email: kotov@mirea.ru
Poponov P. V., postgraduate, Email: poponovpv@mail.ru
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The problem of estimating the coordinates of radiation sources in the two-stage dual-channel single-base radar system . Puts more emphasis on the processing of narrowband signals.

Keywords: processing narrowband signals, multi radar station.

В ряде практических задач координатометрии требуется обеспечить местоположение источников узкополосных сигналов, которыми чаще всего являются стационарные и мобильные радиостанции с непрерывными или прерывистыми сигналами. Задача заключается в том, чтобы построить измерительную систему, достаточно простую с одной стороны и с другой стороны обеспечивающую приемлемые точностные характеристики.

Для решения задачи можно воспользоваться рекомендациями, представленными в [1] и использовать один из вариантов пассивных многопозиционных радиолокационных систем (РЛС), обладающих лучшими точностными характеристиками по сравнению с однопозиционными РЛС. Как известно, наиболее точной пассивной многопозиционной РЛС при приеме широкополосных сигналов

является разностно-дальномерная РЛС, которая в простейшем варианте при определении координат источника излучения на плоскости представляет собой трёхпозиционную систему [2]. При приёме узкополосных сигналов в пассивном варианте целесообразно использовать разностно-доплеровский метод, который также при измерении координат источника на плоскости требует три позиции (двухбазовая система)[1]. Вместе с тем более простой является двухпозиционная однобазовая система с использованием одного приёмника и ретранслятора [1]. В такой системе можно использовать угломерный метод или комбинированный угломерно-доплеровский или разностно-дальномерно- разностно-доплеровский методы [1]. Угломерный метод не обладает достаточной точностью, поэтому наиболее приемлемым вариантом может быть вариант с использованием разностно-дальномерно- разностно- доплеровского метода. В последнем случае структура устройства обработки сигналов должна быть двухканальная. Поскольку разностно-дальномерный канал не обеспечивает высокую точность при приёме узкополосного сигнала, то для повышения точности измерения разности временных задержек целесообразно использовать искусственное расширение спектра принимаемого сигнала [3]. Кроме того, для повышения точности измерений обоими методами предлагается использовать в каждом канале один из квазиоптимальных вариантов фильтрации компонентов векторов состояния объекта наблюдения.

Итак, с учётом изложенного геометрическое построение измерительной системы представляется в виде, представленном на рис. 1

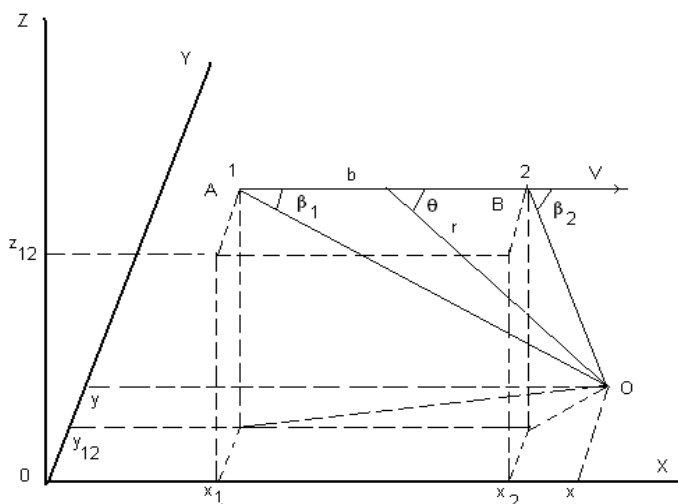


Рис. 1. Геометрическое построение однобазовой пассивной РЛС.

Полагается, что в точке В (2) на летательном аппарате (ЛА) расположен приёмник, совмещённый с пунктом обработки информации (ПОИ), а ретранслятор, также

расположенный на ЛА, находится в точке А (1). Координаты ЛА измеряются с помощью спутниковых навигационных систем с достаточно высокой точностью, так что значение базы b известно в любой, необходимый для измерений момент времени. Считается, что компоненты вектора состояния объекта наблюдения O дискретны и их можно аппроксимировать марковской последовательностью. Источник излучения либо неподвижен, либо перемещается достаточно медленно по случайному закону. Предполагается, что отношение сигнал/шум может быть обеспечено достаточно большим, поскольку система пассивна и используется фильтрация компонентов вектора состояния.

С учётом изложенного в приёмнике может быть измерена пара первичных параметров сигнала – разность временных задержек τ и разность доплеровских сдвигов F . Их значения могут быть определены из следующих соотношений:

$$\tau = \frac{1}{\tilde{n}} \left[b + \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_{12})^2 + z_{12}^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_{12})^2 + z_{12}^2} \right], \quad (1)$$

$$F = f_0 \frac{v}{c} [\cos\beta_1 - \cos\beta_2], \quad (2)$$

где: f_0 - частота несущей излучаемого объектом колебания,

v - скорость перемещения ЛА,

c – скорость распространения радиоволн,

β_1 и β_2 - углы между линиями визирования и вектором скорости ЛА;

$$\cos\beta_1 = \frac{x-x_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_{12})^2 + z_{12}^2}}, \quad (3)$$

$$\cos\beta_2 = \frac{x-x_2}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_{12})^2 + z_{12}^2}}. \quad (4)$$

Поскольку объект мало подвижен, то можем предположить, что математические ожидания его координат равны некоторым детерминированным значениям, а флуктуации координат заданы соответствующими дисперсиями. Тогда модель вектора состояния объекта наблюдения, состоящего из двух компонентов $\vec{\Lambda} = [x \ y]^T$ определяется согласно [4] уравнением

$$\bar{\Lambda}^{(v)} = \Phi \bar{\Lambda}^{(v-1)} + B \bar{N}^{(v)} \quad (5)$$

где: $\bar{\Lambda}^{(v)}$ и $\bar{\Lambda}^{(v-1)}$ - векторы состояния объекта на $v-i$ и $(v-1)-i$ интервале, соответственно,

Φ - матрица перехода, характеризующая динамические свойства объекта,

B - матрица формирующих воздействий характеризующая случайный характер местоположения объекта,

$\bar{N}^{(v)}$ - гауссовский случайный вектор с $\langle N^{(v)} \rangle = 0$ и $\langle N^{(v)} N^{(\mu)} \rangle = I \delta_{\mu v}$; I - единичная матрица; $\delta_{\mu v}$ - символ Кронекера.

Согласно (5) значения координат x и y на $v-i$ интервале могут быть представлены выражениями

$$\begin{cases} x^{(v)} = a_x x^{(v-1)} + b_x n_x^{(v)}, \\ y^{(v)} = a_y y^{(v-1)} + b_y n_y^{(v)}. \end{cases} \quad (6)$$

В простейшем случае коэффициенты a_x и a_y можно положить равными единице.

Тогда из (6) имеем

$$\begin{cases} x^{(v)} = x^{(v-1)} + b_x n_x^{(v)}, \\ y^{(v)} = y^{(v-1)} + b_y n_y^{(v)}. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (7) получаются из (5), если принять

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_x & 0 \\ 0 & b_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Полагая, что согласно (2) и (3) истинные значения τ и F на $\nu-i$ тактовом интервале равны

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau^{(\nu)} = \frac{1}{\tilde{h}} \left[b + \sqrt{(x^{(\nu)} - x_1)^2 + (y^{(\nu)} - y_{12})^2 + z_{12}^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{(x^{(\nu)} - x_2)^2 + (y^{(\nu)} - y_{12})^2 + z_{12}^2} \right], \\ F^{(\nu)} = f_0 \frac{\nu}{c} \left[\frac{x^{(\nu)} - x_1}{\sqrt{(x^{(\nu)} - x_1)^2 + (y^{(\nu)} - y_{12})^2 + z_{12}^2}} - \right. \\ \left. - \frac{x^{(\nu)} - x_2}{\sqrt{(x^{(\nu)} - x_2)^2 + (y^{(\nu)} - y_{12})^2 + z_{12}^2}} \right]. \end{array} \right. \quad (10)$$

Используя методику, принятую в [1], получим уравнения фильтрации для апостериорных оценок координат и ковариационной матрицы ошибок в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{ps}^{(\nu)} = x_{\hat{y}}^{(\nu)} + D_{ps,x}^{(\nu)} g_x + K_{xy}^{(\nu)} g_y, \\ \hat{y}_{ps}^{(\nu)} = y_{\hat{y}}^{(\nu)} + K_{xy}^{(\nu)} g_x + D_{ps,y}^{(\nu)} g_y, \end{array} \right. \quad (11)$$

$$K_{ps}^{(\nu)} = \begin{bmatrix} D_{ps,x}^{(\nu)} & K_{xy}^{(\nu)} \\ K_{xy}^{(\nu)} & D_{ps,y}^{(\nu)} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\text{где: } \left\{ \begin{array}{l} x_{\hat{y}}^{(\nu)} = \hat{x}_{ps}^{(\nu-1)}, \\ y_{\hat{y}}^{(\nu)} = \hat{y}_{ps}^{(\nu-1)}, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} g_x = \frac{\partial \tau}{\partial x} A_1 + \frac{\partial F}{\partial x} A_2, \\ g_y = \frac{\partial \tau}{\partial y} A_1 + \frac{\partial F}{\partial y} A_2, \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{ps,x}^{(\nu)} = \left(\frac{D_{ps,x}^{(\nu-1)} + b_x^2}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} \right) \frac{1}{\Delta_{KH}}, \\ K_{xy}^{(\nu)} = \left(\frac{K_{xy}^{(\nu-1)}}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial y} \right) \frac{1}{\Delta_{KH}}, \\ D_{ps,y}^{(\nu)} = \left(\frac{D_{ps,y}^{(\nu-1)} + b_y^2}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} \right) \frac{1}{\Delta_{KH}}, \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{\sigma_{\tau}^2} \left\{ \hat{\tau} - \frac{1}{\hat{n}} \left[b + \sqrt{(x_{\hat{y}}^{(v)} - x_1)^2 + (y_{\hat{y}}^{(v)} - y_{12})^2 + z_{12}^2} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sqrt{(x_{\hat{y}}^{(v)} - x_2)^2 + (y_{\hat{y}}^{(v)} - y_{12})^2 + z_{12}^2} \right] \right\}, \\ A_2 &= \frac{1}{\sigma_F^2} \left\{ \hat{F} - f_0 \frac{v}{c} \left[\frac{x_{\hat{y}}^{(v)} - x_1}{\sqrt{(x_{\hat{y}}^{(v)} - x_1)^2 + (y_{\hat{y}}^{(v)} - y_{12})^2 + z_{12}^2}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{x_{\hat{y}}^{(v)} - x_2}{\sqrt{(x_{\hat{y}}^{(v)} - x_2)^2 + (y_{\hat{y}}^{(v)} - y_{12})^2 + z_{12}^2}} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta_{\hat{y}} &= (D_{ps,x}^{(v-1)} + b_x^2)(D_{ps,y}^{(v-1)} + b_y^2) - (K_{xy}^{(v-1)})^2, \\ \Delta_{KH} &= \left(\frac{D_{ps,y}^{(v-1)} + b_y^2}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} \right) \left(\frac{D_{ps,x}^{(v-1)} + b_x^2}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} \right) - \\ &\quad - \left(\frac{K_{xy}^{(v-1)}}{\Delta_{\hat{y}}} - \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial y} \right)^2, \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial x} &= \frac{1}{c} \left[\frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2}} - \frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2}} \right], \\ \frac{\partial \tau}{\partial y} &= \frac{1}{c} \left[\frac{y - y_{12}}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2}} - \frac{y - y_{12}}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2}} \right], \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= f_0 \frac{v}{c} \left\{ \left[(x - x_1)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-0,5} - \right. \\ &\quad - (x - x_1)^2 \left[(x - x_1)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-1,5} - \\ &\quad - \left. \left[(x - x_2)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-0,5} + \right. \\ &\quad \left. + (x - x_2)^2 \left[(x - x_2)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-1,5} \right\}, \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= f_0 \frac{v}{c} \left\{ -[(x - x_1)(y - y_{12})] \left[(x - x_1)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-1,5} + \right. \\ &\quad \left. + [(x - x_2)(y - y_{12})] \left[(x - x_2)^2 + (y - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^{-1,5} \right\}, \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$\hat{x}_{ps}^{(v-1)}$ и $\hat{y}_{ps}^{(v-1)}$ - апостериорные оценки координат на $(v-1)-i$ интервале, определяемые из (11) для $(v-1)-\tilde{\alpha}$ интервала, $\hat{\tau}$ и \hat{F} - оценки максимального

правдоподобия первичных параметров τ и F , определяемые по одному импульсу с учётом ошибок за счёт внутренних шумов $\varepsilon_\tau^{(\tau)}$ и $\varepsilon_F^{(\nu)}$, т. е.

$$\begin{cases} \hat{\tau} = \tau^{(\nu)} + \varepsilon_\tau^{(\nu)} = \tau^{(\nu)} + \sigma_\tau n_\tau^{(\nu)}, \\ \hat{F} = F^{(\nu)} + \varepsilon_F^{(\nu)} = F^{(\nu)} + \sigma_F n_F^{(\nu)}. \end{cases} \quad (17)$$

причём: $\varepsilon_\tau^{(\tau)}$ и $\varepsilon_F^{(\nu)}$ - абсолютные ошибки при измерении по одному импульсу,

σ_τ и σ_F - среднеквадратичные ошибки, которые либо заданы, либо определяются по формулам потенциальной точности [5], n_τ и n_F - гауссовские случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями, получаемые при моделировании от датчика случайных чисел (n_τ и n_F - не коррелированные случайные величины, поскольку оценки $\hat{\tau}$ и \hat{F} получаются от разных измерителей), значения $\tau^{(\nu)}$ и $F^{(\nu)}$ берутся из (10),

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} = \sigma_\tau^2 \left\{ \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} \left[\tau(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{\tau}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right)^2 \right\} + \\ + \sigma_F^2 \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \left[F(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{F}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 \right\}, \\ \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial y} = \sigma_\tau^2 \left\{ \frac{\partial^2 \tau}{\partial x \partial y} \left[\tau(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{\tau}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} \right) \right\} + \\ + \sigma_F^2 \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \left[F(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{F}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) \right\}, \\ \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} = \sigma_\tau^2 \left\{ \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} \left[\tau(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{\tau}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} \right)^2 \right\} + \\ + \sigma_F^2 \left\{ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \left[F(x_{\hat{y}}^{(\nu)}, y_{\hat{y}}^{(\nu)}) - \hat{F}^{(\nu)} \right] + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)^2 \right\}. \end{cases}$$

В формулах (13) первоначальные значения $D_{ps,x}^{(\nu-1)}$ и $D_{ps,y}^{(\nu-1)}$ при $\sigma_F \square \sigma_\tau$ можно, в первом приближении, определить согласно [2] по формуле

$$D_{ps}^{(v-1)} = \frac{4\sigma_\tau^2}{\left(\frac{b}{r_0} \sin \theta_0\right)^4} = \frac{4\sigma_\tau^2 \left[\left\langle \hat{x}_{ps}^{(v-1)} - 0,5(x_1 + x_2) \right\rangle^2 + \left[\left\langle \hat{x}_{ps}^{(v-1)} - 0,5(x_1 + x_2) \right\rangle^2 + (\hat{y}_{ps}^{(v-1)} - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right]^4 \right]}{\left[\left\langle \hat{x}_{ps}^{(v-1)} - 0,5(x_1 + x_2) \right\rangle^2 + (\hat{y}_{ps}^{(v-1)} - y_{12})^2 + z_{12}^2 \right] - \left\langle \hat{x}_{ps}^{(v-1)} - 0,5(x_1 + x_2) \right\rangle^2}.$$

Значение $K_{xy}^{(v-1)} = \lg(l_1 / l_2)$ при $l_1 / l_2 \leq 10$,

где l_1 и l_2 - большая и малая оси эллипса ошибок.

Структура устройства обработки информации в ПОИ имеет вид, представленный на рис. 2.

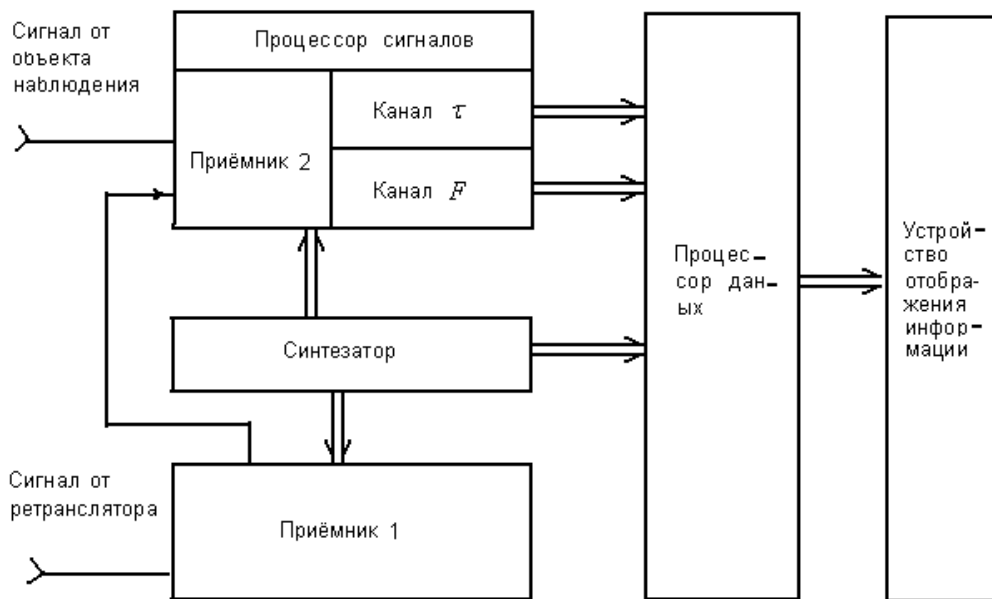


Рис. 2. Структурная схема устройства обработки информации.

Таким образом, рассмотрены способ и структура РЛС, обеспечивающие относительно высокую точность измерения координат источника узкополосных сигналов. Для обеспечения высокой точности измерений предлагается обрабатывать в канале измерения разности временных задержек дискретные сигналы, а в канале измерения разностей доплеровских частот – непрерывные или прерывистые сигналы. При этом в канале измерения разности временных задержек целесообразно использовать искусственное расширение спектра принимаемого сигнала путём

суммирования спектров в частотной области и в обоих каналах – вторичную обработку на базе фильтрации дискретных последовательностей.

Список литературы

1. Кондратьев В. С. , Котов А. Ф., Марков Л. Н. Многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Сов. Радио, 1986. – 264 с.
2. Котов А. Ф. , Сошников И. А. Квазиоптимальная фильтрация вектора состояния цели в разностно-дальномерной РЛС. – М.: МИРЭА, Сб. трудов. Ч.3. Технические науки, 2005. – С. 123 – 127.
3. Заикин А. М., Королёв А. Н., Котов А. Ф.. Корреляционная обработка узкоспектральных сигналов с неизвестными параметрами в пассивном многопозиционном измерителе координат источников непрерывного излучения. – М.: Измерительная техника, №10, 2004. – С. 49 – 52.
4. А. Ф. Котов, В. Б. Гребенников. Импульсные многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Радиотехника, 1987. – С. 6-9.
5. Справочник по радиолокации/ Под ред. М. Сколника. Т. 1. – М.: Сов. Радио, 1976. – 456 с.