

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ

Серия «Радиосвязь и радионавигация»

Радионавигационные технологии

Выпуск 5

Под редакцией А.И. Перова

Москва
Радиотехника
2016

УДК 629.78
ББК 39.67
П 15

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. О.В. Бецкий, акад. Ю.В. Гуляев, д.т.н., проф. А.Ю. Гринев, д.т.н., проф. Ю.Л. Козирацкий, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.т.н., д.б.н. И.В. Матвейчук, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д. т. н., проф. А. И. Перов, к.б.н. А.В. Савельев, акад. А.С. Сигов, д.т.н. проф. М.С. Ярлыков

Серия «Радиосвязь и радионавигация»

Выпуск 5

Рецензент:

докт. техн. наук, профессор *В.Н. Харисов* (ОАО «ВНИИР Прогресс»);
канд. техн. наук., профессор *В.Н. Тяпкин* (ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»)

П 15 Радионавигационные технологии. Вып. 5. Сб. статей / Под ред. *А.И. Перова*. – М.: Радиотехника, 2016. – 146 с.: ил. Научно-технические серии. Серия «Радиосвязь и радионавигация». (Авторы указаны на с. 146)

ISBN 978-5-93108-130-4

Отражены теоретические вопросы спутниковой навигации, технологии перспективной системы ГЛОНАСС, показаны результаты экспериментальных исследований технологий спутниковой навигации; рассмотрены вопросы мониторинга навигационных сигналов; даны приложения технологий спутниковой навигации в различных областях. Книга подготовлена по материалам научно-технической конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении» (сентябрь 2015 г.).

Для научных работников и инженеров, а также преподавателей и студентов вузов.

УДК 629.78
ББК 39.67

ISBN 978-5-93108-130-4

© Авторы, 2016
© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ
Серия «Радиосвязь и радионавигация»

РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Выпуск 5

Под редакцией А.И. Перова

Авторы:

**Болденков Е.Н., Власов И.Б., Ворончихин Д.Н., Гарин Е.Н., Гладышев А.Б.,
Гладышева М.А., Головин П.М., Гребенников А.В., Грибов П.С., Дмитриев Д.Д.,
Днепров В.В., Днепров Д.В., Дьяченко Д.В., Ефименко В.С., Ефремов В.А., Жуков А.Н.,
Захарова Е.В., Зотов С.М., Инчагов Ю.М., Кондратьев А.С., Коннов В.Г., Корогодин И.В.,
Куликов Р.С., Куличков К.А., Лаптев С.В., Липа И.В., Маганет Р.И., Медведев П.В.,
Муравьев А.Б., Муравьев Р.А., Нагин И.А., Немов А.В., Никитин А.В., Оганесян А.А.,
Павлов В.С., Пастухов А.В., Пельтин А.В., Перов А.И., Ратушняк В.Н., Рыжов В.С.,
Савельев С.А., Салтыков А.А., Силин С.В., Соколовский А.В., Трембач В.М., Тупицын И.Н.,
Тюфтяков Д.Ю., Тяпкин В.Н., Устинов А.Ю., Фатеев Ю.Л., Филатченков С.В.,
Фролов А.А., Харисов В.Н., Ченин Д.Ю., Шатилов А.Ю., Шершавин П.В., Шмелев Д.А.**

Изд. № 85. Сдано в набор 22.04.2016
Подписано в печать 27.06.2016. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная
Печ. л. 18,25. Тираж 500 экз. Зак. №

Издательство «Радиотехника»
107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6
тел./факс: (495)621-48-37; 625-78-72, 625-92-41
e-mail: info@radiotec.ru; www.radiotec.ru

Отпечатано
в ФГУП «Издательство «Известия» УД ПРФ

Экспериментальное исследование характеристик навигационного приемника с антенной решеткой и фокусировкой на навигационные спутники

© Авторы, 2016

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

И.В. Корогодин – к.т.н., доцент, кафедра «Радиотехнические системы», Национальный исследовательского университет «МЭИ»

А.И. Перов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Радиотехнические системы», Национальный исследовательского университет «МЭИ»

В.В. Днепров – аспирант, кафедра «Радиотехнические системы», Национальный исследовательского университет «МЭИ»

С.А. Савельев – директор научно-производственного комплекса, филиал ОАО «ОРКК»–«НИИ КП» (Москва)

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик навигационного приемника с 7-элементной антенной решеткой и фокусировкой на навигационные спутники, иллюстрирующее возможность улучшения характеристик точности и помехоустойчивости.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, аппаратура потребителей, антенная решетка, фокусировка на навигационные спутники.

This article represents bench test results of a user apparatus with 7-element antenna array and beam former. The beam former algorithm consists of several difference carrier phase lock loops. Estimates of difference carrier phase are later used to focus correlator outputs on a satellite vehicle. Beam former algorithm is implemented in receiver's software. Series of experiments are given in paper and proof that antenna array and beam forming can improve user apparatus accuracy and increase its antijam capability.

Keywords: beam former, antenna array, user apparatus, global navigation satellite systems.

Современные навигационные приемники специального назначения спутниковой радионавигационной системы (СРНС) ГЛОНАСС в своем составе содержат антенную решетку (АР), радиочастотный блок, блок пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), многоканальный коррелятор и навигационный вычислитель. С целью дальнейшего улучшения характеристик навигационного приемника в него целесообразно включать блок фокусировки на навигационные спутники (НС), который можно ставить либо сразу после блока ПВОС, либо после многоканального коррелятора. В настоящей статье рассматривается второй из указанных вариантов. Схема навигационного приемника представлена на рис. 1, где: РЧБ – радиочастотный блок; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦМПО – цифровой модуль первичной обработки.

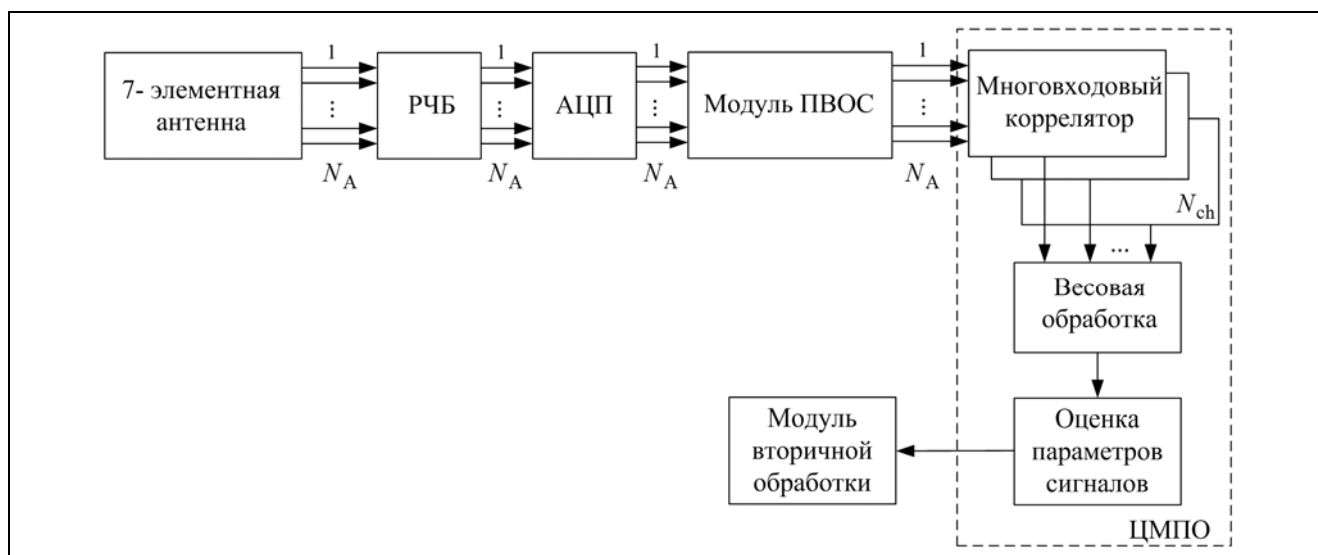


Рис. 1. Схема навигационного приемника

Электромагнитный сигнал поступает на N_A антенных элементов, где $N_A = 7$. С каждого антенного элемента сигнал проходит свой отдельный аналоговый тракт, в котором происходят фильтрация, усиление сигнала, перенос по частоте, после чего осуществляется многоканальное аналого-цифровое преобразование. В цифровом виде все N_A сигналов поступают в модуль ПВОС, где осуществляется подавление помех. На выходе блока формируется N_A обработанных сигналов с пониженной разрядностью, каждый из которых по фазе соответствует своему антенному входу. Все N_A сигналов поступают в блок корреляционной обработки, содержащий многоканальный коррелятор для каждого из принимаемых N_{ch} навигационных сигналов. В каждом отдельном канале коррелятора, соответствующего отдельному спутнику, накапливаются корреляционные интегралы для каждого антенного входа отдельно. Все результаты накопления доступны для чтения процессором приёмника. В программном обеспечении процессора для каждого принимаемого сигнала осуществляется считывание результатов накопления корреляционных интегралов со всех антенных элементов. Программно осуществляется умножение на вектор весовых коэффициентов (фокусировка на НС), после чего результаты складываются, и формируется результат накопления для заданной диаграммы направленности на спутник. Далее реализуются системы слежения и оценки параметров сигналов, интерфейс с модулем вторичной обработки.

Пусть $\dot{y}(t)$ – комплексный вектор сигналов на выходах АР. Так как в аналоговых трактах РЧБ-сигналы приобретают неидентичные фазовые набег, то вектор комплексных амплитуд на выходе радиотрактов можно представить как

$$\dot{y}_{тр}(t) = \dot{M}_{тр} \dot{y}(t),$$

где $\dot{M}_{тр}$ – квадратная диагональная матрица с соответствующими фазовыми множителями на главной диагонали.

Рассмотрим алгоритм обработки одного навигационного сигнала, проходящего от НС, характеризующегося направлением α_c . Алгоритм пространственной обработки сигналов с выходов радиотрактов можно представить в виде [1]:

$$\dot{y}_{вых}(t) = \dot{H}^{*T}(\alpha_c) \dot{M}_{тр}^{-1} \dot{\beta}^* \dot{y}_{тр}(t), \quad (1)$$

где $\dot{H}(\alpha_c)$ – комплексная матрица, характеризующая фазовые набег для навигационного сигнала, проходящего с направления α_c , на различных элементах АР; $\dot{\beta}^*$ – матрица пространственной обработки сигналов с выхода РЧБ.

Матрица $\dot{M}_{тр}^{-1}$ оценивается при начальной калибровке приемника по тестовому зенитному сигналу в безэховой камере.

Введем вектор сигналов на выходе блока ПВОС:

$$\dot{y}_1(t) = \dot{\beta}^* \dot{y}_{тр}(t) \quad (2)$$

и запишем (1) в виде

$$\dot{y}_{вых}(t) = \dot{H}^{*T}(\alpha_c) \dot{M}_{тр}^{-1} \dot{y}_1(t). \quad (3)$$

Отметим, что алгоритм (2) является общим для всех сигналов, тогда как алгоритм (3) необходимо выполнять для каждого навигационного сигнала из-за индивидуальных векторов фокусировки $\dot{H}^{*T}(\alpha_c)$.

Дальнейшая корреляционная обработка сигнала $\dot{y}_{вых}(t)$ предполагает домножение на опорный сигнал и накопление:

$$\dot{X}_{IQ,k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{y}_{вых}(t) h_{дк}(t - \tau_{оп}) \cdot e^{j\varphi_{оп}(t)} dt, \quad (4)$$

где $h_{\text{дк}}(t - \tau_{\text{оп}})$ – функция дальномерного кода, принимающая значения ± 1 ; $\tau_{\text{оп}}$ – задержка опорного колебания; $\varphi_{\text{оп}}(t)$ – фаза опорного колебания.

Подставив (3) в (4), получим

$$\dot{X}_{IQ,k} = \dot{\mathbf{H}}^{*\text{T}}(\mathbf{a}_c) \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}^{-1} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{\mathbf{y}}_1(t) h_{\text{дк}}(t - \tau_{\text{оп}}) \cdot e^{j\varphi_{\text{оп}}(t)} dt. \quad (5)$$

Алгоритм (5) предполагает выполнение фокусировки на НС после корреляторов, как это приведено на рис. 1. Для реализации данного алгоритма необходимо:

выполнить калибровку ЦМПО и найти элементы матрицы $\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}^{-1}$; $\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}$ – диагональная матрица размерностью $N_A \times N_A$, элементы которой отражают фазовые набег в соответствующих каналах РЧБ;

рассчитать вектор фокусировки $\dot{\mathbf{H}}^{*\text{T}}(\mathbf{a}_c)$.

Для расчета $\dot{\mathbf{H}}^{*\text{T}}(\mathbf{a}_c)$ необходима следующая информация:

1. Координаты приемника в глобальной системе координат ECEF: $\mathbf{X}_{\text{ККС}} = [x \ y \ z]^T$. Эти координаты полагаются известными.

2. Текущие координаты спутника на момент вычисления вектора $\dot{\mathbf{H}}^{*\text{T}}(\mathbf{a}_c)$: $\mathbf{X}_{\text{сп}} = [x_{\text{сп}} \ y_{\text{сп}} \ z_{\text{сп}}]^T$. Эти координаты вычисляются по эфемеридной информации либо по данным альманаха системы с использованием стандартных процедур, приведенных в интерфейсном контрольном документе (ИКД).

3. Ориентация AP в глобальной системе координат, заданная матрицей ориентации $\mathbf{C}_{ECEF}^{\text{AP}}$. Эта матрица вычисляется по результатам геодезической привязки AP по азимуту и горизонту.

4. Координаты фазовых центров элементов AP в системе координат антенной решетки: $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, $i = 1 \dots 7$. Данные координаты считаются известными (рассчитываются по чертежам конструкции AP).

Находим направление на спутник в виде радиуса-вектора единичной длины в координатах AP:

$$\mathbf{r}_{\text{сп}} = \mathbf{C}_{ECEF}^{\text{AP}} \cdot \frac{(\mathbf{X}_{\text{сп}} - \mathbf{X}_{\text{НАП}})}{\|\mathbf{X}_{\text{сп}} - \mathbf{X}_{\text{НАП}}\|}.$$

Набег фазы сигнала для i -го антенного элемента относительно координатного центра AP будет определяться проекцией радиуса-вектора координат элемента \mathbf{r}_i на линию визирования, заданную вектором $\mathbf{r}_{\text{сп}}$:

$$d_i = \mathbf{r}_i^T \mathbf{r}_{\text{сп}}.$$

Отсюда вектор фокусировки $\dot{\mathbf{H}}$ можно записать как

$$\dot{\mathbf{H}} = \left[e^{-j\frac{2\pi d_1}{\lambda}} \quad e^{-j\frac{2\pi d_2}{\lambda}} \quad \dots \quad e^{-j\frac{2\pi d_7}{\lambda}} \right]^T,$$

где λ – длина волны навигационного сигнала.

Фокусировка выполняется в соответствии с алгоритмом (5). В результате получаем один комплексный отсчет коррелятора, сфокусированного на НС.

Рассмотрим фокусировку подробнее для сигнала одного НС. Задача фокусировки – когерентно сложить принимаемый на разные антенны сигнал КА. Пусть имеются 7 комплексных выходов многоходового коррелятора, образованных центральными («rgomt») синфазной и квадратурной компонентами:

$$\dot{\mathbf{Z}} = [\dot{Z}_1, \dots, \dot{Z}_7] = [I_1 + jQ_1, \dots, I_7 + jQ_7].$$

Сигнал каждой антенны имеет различный фазовый сдвиг ψ относительно остальных компонент из-за пространственного разнесения антенн. Схематично это отражено на рис. 2.

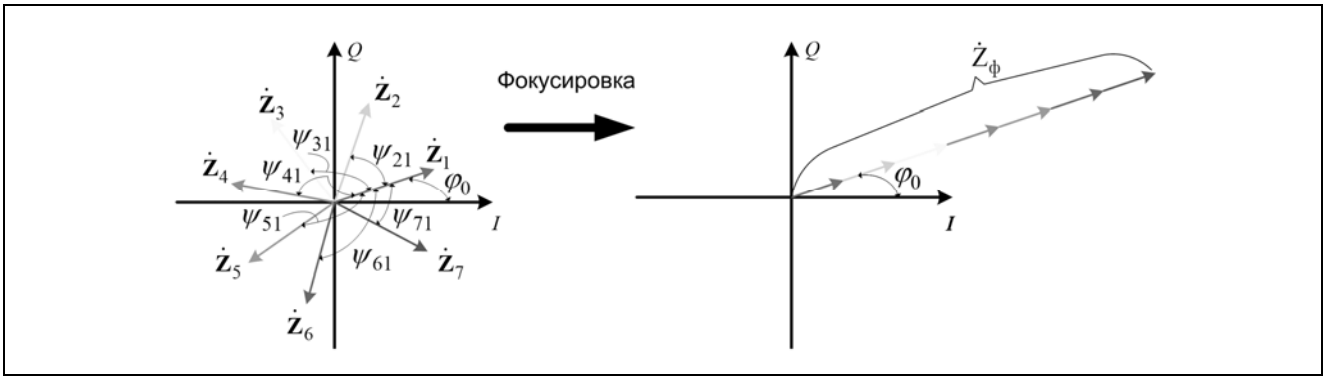


Рис. 2. Схема процесса фокусировки после коррелятора

При этом не показаны шумы наблюдений; амплитуды сигналов в разных каналах многовходового коррелятора также для простоты показаны одинаковыми. Для осуществления фокусировки необходимо когерентно сложить векторы $\dot{Z}_1, \dots, \dot{Z}_7$. Для этого нужно выбрать один вектор как основной и «довернуть» по фазе остальные векторы к нему. После чего сложение векторов $\dot{Z}_1, \dots, \dot{Z}_7$ даст сфокусированный вектор \dot{Z}_ϕ .

Таким образом, для осуществления фокусировки наряду с описанным ранее весовым алгоритмом обработки можно предложить следующий подход. Необходимо оценить разность фаз между одной, выбранной за основную, и остальными выходными компонентами многовходового коррелятора; помножить комплексные выходы $\dot{Z}_2, \dots, \dot{Z}_7$ коррелятора на вектор фокусировки $\mathbf{H} = [1, e^{j\psi_{21}}, \dots, e^{j\psi_{71}}]^T$ и сложить результат:

$$\dot{Z}_\phi = \mathbf{H}^{*T} \dot{\mathbf{Z}}$$

Рассмотрим далее алгоритм оценивания разности фаз.

Разность фаз является изменяющимся во времени параметром, поэтому для ее оценки целесообразно использовать следящую систему за разностью фаз (ССРФ). Синтез и анализ такого алгоритма приведен в [2]. Схема применения ССРФ для фокусировки сигнала одного КА представлена на рис. 3.

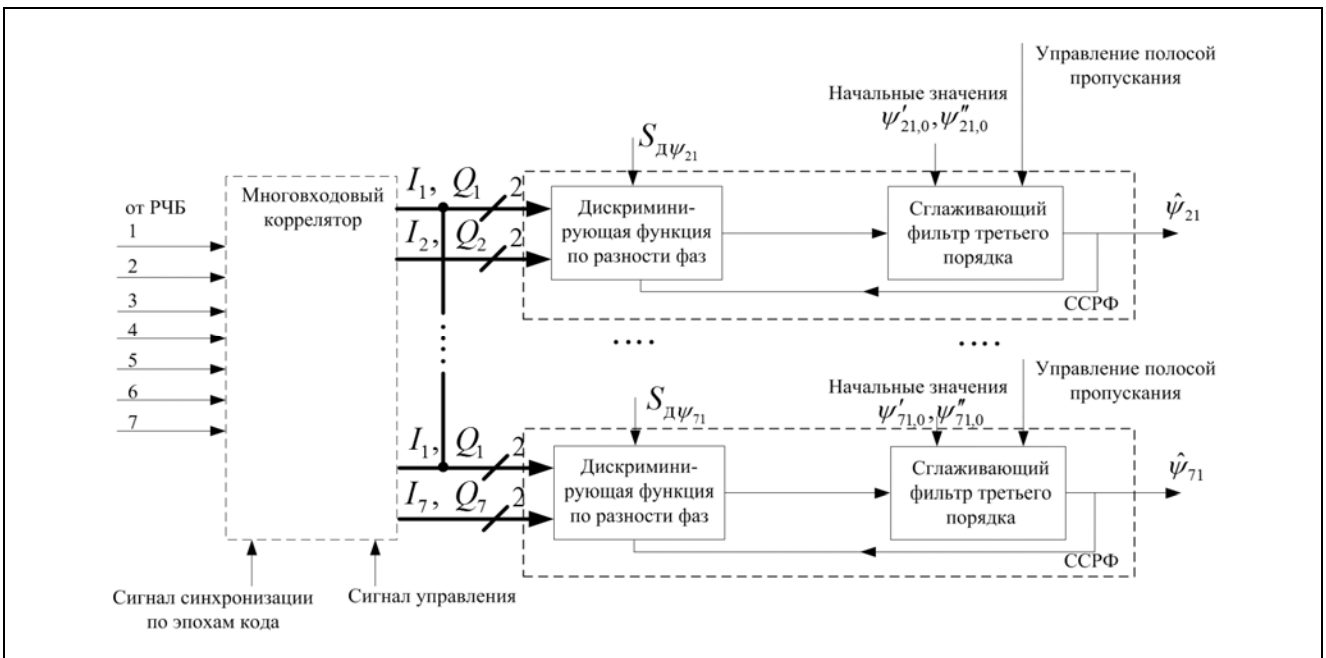


Рис. 3. Применение ССРФ для фокусировки на НС

При таком подходе, в программно-математическом обеспечении ЦМПО, наряду с обычными системами слежения за фазой, частотой, задержкой, организуются $N_A - 1$ ССРФ для каждого сигнала, подлежащего пространственно-временной обработке. В векторном виде ССРФ за разностью фаз первой и m -й антенны описывается следующим уравнением фильтрации:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\psi m,k} = \tilde{\mathbf{x}}_{\psi m,k} + \mathbf{K}_{\psi} u_{\psi m,k} / S_{д\psi},$$

где

$$\hat{\mathbf{x}}_{\psi m,k} = [\psi_{m1,k}, \psi'_{m1,k}, \psi''_{m1,k}]^T \text{ – вектор оценок разности фаз и ее производных;}$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\psi m,k} = [\tilde{\psi}_{m1,k}, \tilde{\psi}'_{m1,k}, \tilde{\psi}''_{m1,k}]^T \text{ – вектор экстраполированных оценок;}$$

$$u_{\psi m,k} = \text{atan2}(Q_m, I_m) - \text{atan2}(Q_1, I_1) \text{ – отсчет дискриминирующей функции;}$$

$S_{д\psi}$ – крутизна дискриминирующей функции для приведенной функции $S_{д\psi} = 1$.

В контуре ССРФ используется сглаживающий фильтр третьего порядка, который в развернутом виде описывается соотношениями:

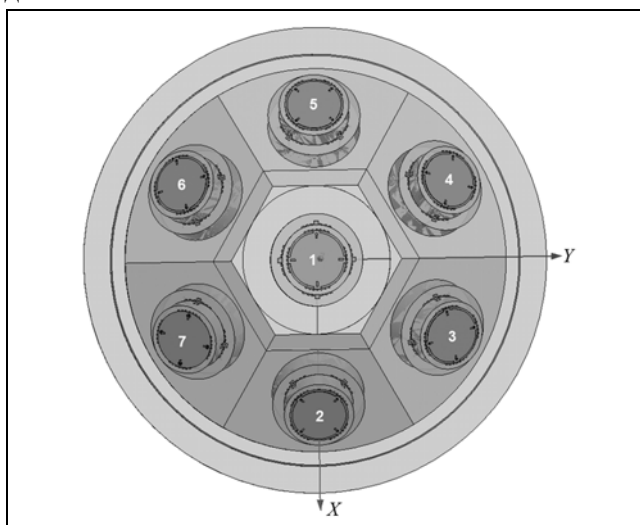


Рис. 4. Расположение антенных элементов в БАР-7

$$\hat{\psi}_{m1,k} = \tilde{\psi}_{m1,k} + K_1 u_{д\psi m,k} / S_{д\psi};$$

$$\hat{\psi}'_{m1,k} = \tilde{\psi}'_{m1,k} + K_2 u_{д\psi m,k} / S_{д\psi};$$

$$\hat{\psi}''_{m1,k} = \tilde{\psi}''_{m1,k} + K_3 u_{д\psi m,k} / S_{д\psi};$$

$$\tilde{\psi}_{m1,k} = \hat{\psi}_{m1,k-1} + \tilde{T} \hat{\psi}'_{m1,k-1};$$

$$\tilde{\psi}'_{m1,k} = \hat{\psi}'_{m1,k-1} + \tilde{T} \hat{\psi}''_{m1,k-1}.$$

где \tilde{T} – темп работы фильтра; K_1, K_2, K_3 – весовые коэффициенты фильтра, которые удобно представить в виде $K_1 = K_{1н} \tilde{T}$, $K_2 = K_{2н} \tilde{T}$, $K_3 = K_{3н} \tilde{T}$, причем рекомендуется использовать $K_{1н} = 2(K_{3н})^{1/3}$, $K_{2н} = 2(K_{3н})^{2/3}$.

Значение коэффициента $K_{3н}$ определяется требуемой полосой пропускания $\Delta f_{ССРФ}$ ССРФ в соответствии с формулой

$$K_{3н} = 1,2(\Delta f_{ССРФ})^3.$$

Результаты экспериментальных исследований. В ходе экспериментальных исследований использовалась 7-элементная АР БАР-7 (блок антенной решетки 7-элементный) разработки филиала ОАО «ОРКК»–«НИИ КП», которая конструктивно представляет собой усеченную шестигранную призму, на малом основании которой установлен центральный (основной) элемент, а на гранях призмы – шесть боковых АЭ. Угол между нормалью основания и нормалью к граням призмы составляет 30° . Внешний вид призмы, расположение элементов в составе решетки и положение системы координат представлены на рис. 4.

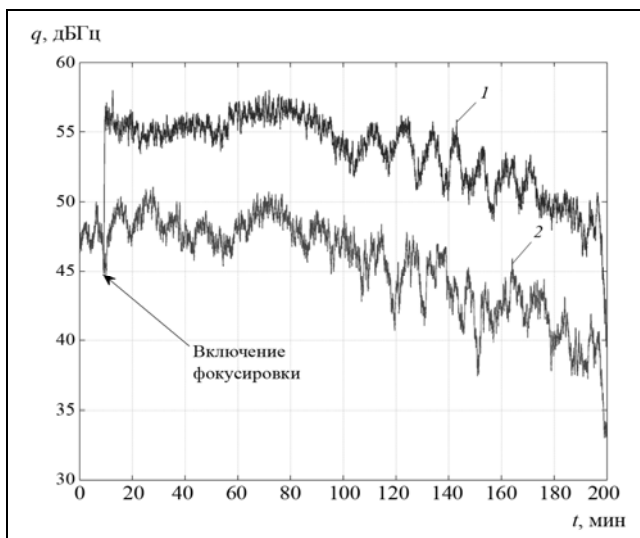


Рис. 5. Отношение сигнал/шум: 1 – с фокусировкой; 2 – без фокусировки

При проведении эксперимента первые 10 мин приемник работает без осуществления фокусировки; системы первичной обработки используют сигналы антенны №1, расположенной в центре БАР-7 горизонтально. На 10-й минуте подается команда на включение фокусировки.

На рис. 5 приведены зависимости отношения сигнал/шум q на выходах одного канала коррелятора до фокусировки и после фокусировки, из которых следует, что средний выигрыш в отношении сигнал/шум за счет фокусировки составляет 8 дБ.

На рис. 6 представлены рассчитанные в ходе эксперимента СКО оценки задержки сигнала по следующей методике. Формируемые в приемнике измерения разбиваются на равные интервалы (длину интервала можно менять); среди них выбирают интервалы с почти постоянным отношением сигнал/шум, рассчитывают на этих интервалах СКО[код-фаза-тренд]. Таким образом, набирается статистика. В результате строится график СКО на этих интервалах от среднего на этих интервалах отношения $q_{c/n0}$ сигнал/шум [дБГц]. Пример рассчитанной СКО для НС №15 сигнала ГЛОНАСС L1OF показан на рис. 6, из которого видно, что использование фокусировки позволяет получить выигрыш по СКО кодовых измерений дальности в 2–2,5 раза.

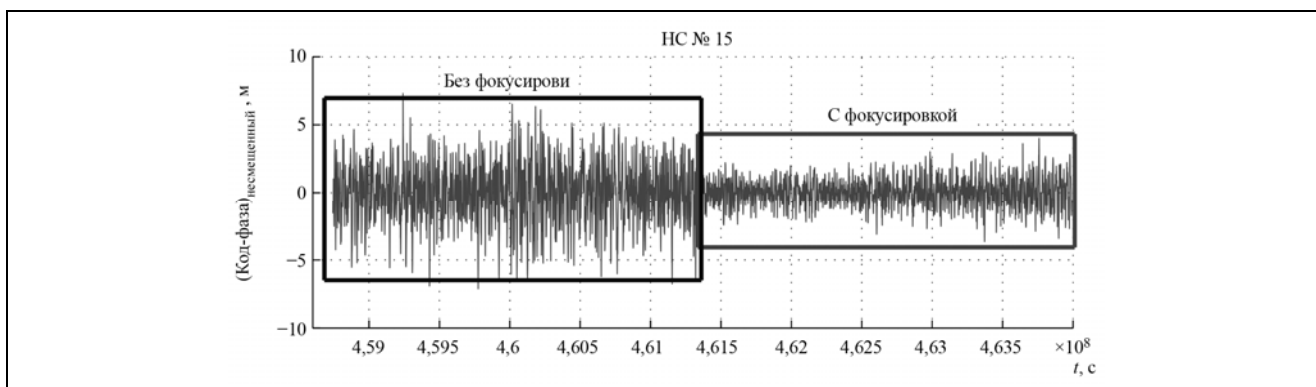


Рис. 6. Выборочные значения СКО

На рис. 7 представлен результат обработки приведенных на рис. 6 выборочных значений СКО (точки). Сплошной линией показана теоретическая кривая, соответствующая СКО шумовой ошибки в системе слежения за задержкой с фильтром второго порядка, полосой 0,5 Гц.

Приведены результаты экспериментальных исследований навигационного приемника с 7-элементной антенной решеткой и фокусировкой на навигационные спутники. Показано, что использование фокусировки на НС обеспечивает повышение отношения сигнал/шум на 8 дБ и снижение СКО кодовых измерений дальности в 2 – 2,5 раза.

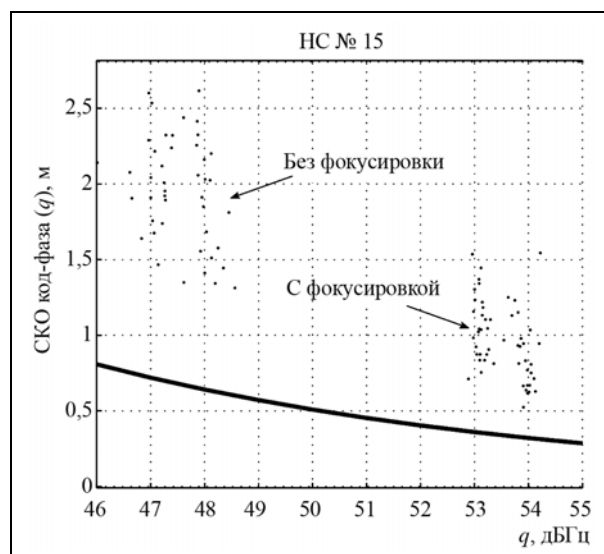


Рис. 7. СКО кодовых измерений дальности

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е. / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника. 2010. 800 с.
2. Перов А.И., Корогодин И.В. Синтез и анализ дискриминаторов разностей фаз сигналов, принимаемых на множестве пространственно-разнесенных точек // Радиотехника. 2010. № 7. С. 84–92.