

Разработка и экспериментальные исследования алгоритма формирования лучей на навигационные спутники

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

П.С. Грибов – инженер-программист 2-й категории, ЗАО «КБ «НАВИС»**И.П. Выонов** – инженер-программист 1-й категории, ЗАО «КБ «НАВИС»**А.Ю. Шатилов** – к.т.н., начальник отделения БТ ИНС, ЗАО «КБ «НАВИС»

Предлагается алгоритм калибровки РЧ трактов НАП СРНС, позволяющий эффективно использовать алгоритм фокусировки луча ДН АР в заданном направлении. Приводятся результаты экспериментального исследования работы алгоритма, полученные в безэховой камере на макете помехозащищенной НАП.

Ключевые слова: антенная решетка, корреляционная матрица, пространственная обработка сигналов, вектор весовых коэффициентов, калибровка неидентичности РЧ трактов, алгоритм фокусировки, формирование максимума ДН АР, помехозащита НАП.

GNSS receiver RF paths calibration algorithm has been proposed. Algorithm improves the beamforming algorithm characteristics. The results of the beamforming experiment, performed in an anechoic chamber using anti-jam receiver, were presented.

Keywords: antenna array, correlation matrix, spatial signal processing, weight vector, RF paths non-identity calibration, beamforming algorithm, anti-jam GNSS receiver.

Наибольший интерес среди алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов представляют алгоритмы, работающие по критерию максимума отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе блока пространственной обработки сигналов (ПОС). При наличии помеховых сигналов использование таких алгоритмов обеспечивает формирование нулей диаграммы направленности (ДН) в направлении действия помех и максимума ДН в направлении прихода полезного сигнала.

Вместе с тем, при синтезе таких алгоритмов не учитывается ряд факторов, присутствующих в реальной аппаратуре, и оказывающих влияние на точность наведения луча [1-4]. Основным фактором, снижающим точность фокусировки луча, является наличие фазовой неидентичности радиочастотных (РЧ) трактов навигационной аппаратуры потребителей (НАП). При прохождении через РЧ тракты полезный сигнал приобретает различные фазовые задержки в различных трактах, из-за чего возникают фазовые искажения навигационного сигнала, которые не учитываются при его обработке. При увеличении разброса фаз в каналах НАП точность направления максимум ДН антенной решетки (АР) в заданном направлении снижается, а сам максимум становится более размытым. В результате снижается энергетический выигрыш в ОСШ, получаемый за счет фокусировки, и использование алгоритма становится не эффективным.

Ниже предлагается алгоритм калибровки РЧ трактов НАП, основанный на измерении корреляционной матрицы сигнала с выхода АР при воздействии на НАП зенитного шумового сигнала. Алгоритм калибровки реализован совместно с алгоритмом фокусировки лучей в помехозащищенной аппаратуре, создаваемой в рамках ОКР «Горизонт-Н». Приведены результаты экспериментальных исследований энергетического выигрыша, даваемого этими алгоритмами.

Математическая модель входных сигналов и блока помехозащиты. Рассмотрим АР, элементы которой произвольным образом расположены в плоскости XOY системы координат, связанной с АР. Геометрическое расположение антенных элементов A_k , задается векторами ρ_{Ak} , $k = 1, \dots, m$, где m – количество АЭ.

Рассмотрим случай приема одного навигационного сигнала, приходящего с направления угла азимута α_0 и угла места θ_0 . Вектор ρ_s – единичный вектор, описывающий направление прихода полезного сигнала:

$$\rho_s = \{x_s, y_s, z_s\}^T; \rho_{Ak} = \{x_{Ak}, y_{Ak}, z_{Ak}\}^T.$$

Комплексные амплитуды сигналов на выходе антенной решетки можно представить в векторной форме [1]:

$$\dot{\xi}(t) = \dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c) \dot{S}_n(t, \lambda) + \dot{\mathbf{n}}_{\Sigma}(t), \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c)$ – вектор фазовых множителей, описывающий фазовые задержки полезного сигнала по апертуре АР; $\dot{S}_n(t, \lambda)$ – комплексная амплитуда навигационного сигнала; λ – вектор информационных параметров сигнала; $\dot{\mathbf{n}}_{\Sigma}(t)$ – вектор комплексных амплитуд (КА) собственных шумов НАП.

Вектор $\dot{\mathbf{H}}(t)$ – вектор фокусировки

$$\dot{\mathbf{H}}(t) = \left[\exp\{j\phi_{c1}(\alpha_c, \theta_c)\} \exp\{j\phi_{c2}(\alpha_c, \theta_c)\} \dots \exp\{j\phi_{cm}(\alpha_c, \theta_c)\} \right]^T,$$

где $\phi_{ci}(\alpha_c, \theta_c) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(\rho_s, \rho_{ik})$ – фазы; (ρ_s, ρ_{ik}) – скалярное произведение векторов ρ_s и ρ_{ik} ; λ_0 – длина волны несущей навигационного сигнала.

Запишем комплексные амплитуды сигналов на выходе РЧ трактов. Учтем, что сигналы на выходах аналоговых трактов имеют различные фазовые набеги, вызванные неточностью технологического изготовления радиочастотных трактов. Вектор КА сигналов на выходе РЧ трактов можно представить как

$$\dot{\xi}_{\text{тр}}(t) = \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}} \cdot \dot{\xi}(t) = \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}} \dot{\mathbf{H}}(t) \dot{S}_n(t, \lambda) + \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}} \dot{\mathbf{n}}_{\Sigma}(t), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}$ – квадратная диагональная матрица с фазовыми множителями на главной диагонали:

$$\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}} = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_2} & & i \\ i & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & e^{j\varphi_m} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ – фазовые набеги, определяющие неидентичность РЧ трактов.

Запись (2) позволяет математически учесть прохождение полезного сигнала через РЧ тракты, обладающие фазовой неидентичностью.

Алгоритм фокусировки луча ДН АР при известном направлении прихода полезного сигнала α_c, θ_c . Оптимальный вектор весовых коэффициентов (ВВК) диаграммообразующего блока определяется выражением

$$\dot{\beta} = \dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c), \quad (4)$$

а алгоритм пространственной обработки

$$\dot{y}_{\text{экс}} = \dot{\beta}^H \dot{\xi}_{\text{тр}}(t) = \dot{\beta}^H \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}} \dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c) \dot{S}_n(t, \lambda) + \dot{n}_{\text{экс}} = \underbrace{\dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c)^H \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}}_{\dot{\beta}_{\text{тр}}^H} \dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c) \dot{S}_n(t, \lambda) + \dot{n}_{\text{экс}} = \dot{\beta}_{\text{тр}}^H \dot{\xi}(t). \quad (5)$$

Из алгоритма (5) видно, что учет искажений полезного сигнала в РЧ трактах можно отнести к ВВК, который будет определяться как

$$\dot{\beta}_{\text{тр}} = \dot{\mathbf{H}}(\alpha_c, \theta_c) \dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}^H. \quad (6)$$

Такое представление ВВК позволяет рассчитать ДН АР для случая, когда присутствуют искажения в РЧ трактах.

Сравнивая (4) и (6) получим теоретическую оценку потерь в ОСШ на выходе блока ПОС, вызванных фазовой неидентичностью РЧ трактов, при использовании алгоритма фокусировки.

Рассмотрим матрицу искажений $\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}$. Пусть фазы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ – выборка нормальной случайной величины с нулевым средним и СКО σ [град]. Тогда степень неидентичности фазовых характеристик РЧ трактов будет определяться параметром СКО, т.е. $\dot{\mathbf{M}}_{\text{тр}}(\sigma)$.

Запишем отношение диаграмм направленностей для случая, когда искажения в РЧ трактах отсутствуют и присутствуют:

$$\Delta(\sigma) = 20 \log \left(M \left[\frac{U_c(\alpha_{c0} | \hat{\beta})}{U_c(\alpha_{c0} | \hat{\beta}_{\text{пр}}(\sigma))} \right] \right), \quad (7)$$

где $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания;

$U_c(\alpha_{c0} | \hat{\beta})$ – значения ДН АР на направлении α_{c0} .

Величина $\Delta(\sigma)$ показывает, на сколько ухудшается ОСШ на выходе блока ПОС при появлении искажений в трактах, если использовать алгоритм фокусировки.

На рис. 1 приводится зависимость $\Delta(\sigma)$ для 4-элементной АР, полученная по ряду статистических испытаний. Из рисунка видно, что по мере увеличения СКО фаз в РЧ трактах потери $\Delta(\sigma)$ растут, что является следствием снижения точности фокусировки луча ДН в направлении α_{c0} . Алгоритм калибровки фазовых неидентичностей РЧ трактов НАП позволяет повысить точность формирования луча ДН в заданном направлении и снизить уровень потерь.

Алгоритм калибровки. Рассмотрим воздействие гармонического сигнала с амплитудой A и начальной фазой φ_c на АР. В этом случае КА сигналов на выходе АР

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{H}(\alpha_c, \theta_c) A e^{j\varphi_c} + \mathbf{n}_{\Sigma}(t).$$

Пусть элементы АР находятся в плоскости XOY, а гармонический сигнал действует с зенитного направления ($\theta_c = 90$ град). Тогда все элементы вектора $\mathbf{H}(\alpha_c, \theta_c)$ будут равны единице, и наблюдения на выходе АР примут вид

$$\dot{\xi}(t) = A e^{j\varphi_c} + \mathbf{n}_{\Sigma}(t). \quad (8)$$

Прохождение сигнала через искажающие РЧ тракты опишем умножением наблюдений (8) на вектор $\mathbf{w} = \text{diag}(\mathbf{M}_{\text{пр}}) = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1} & e^{j\varphi_2} & \dots & e^{j\varphi_m} \end{bmatrix}^T$. Сигнал на выходе РЧ трактов примет вид

$$\dot{\xi}_{\text{пр}}(t) = \mathbf{w} A e^{j\varphi_c} + \mathbf{n}_{\Sigma}(t). \quad (9)$$

Пусть $\mathbf{n}_{\Sigma}(t)$ – комплексный БГШ с двусторонней спектральной плотности мощности $N_0/2$, тогда корреляционная матрица наблюдений (9)

$$\mathbf{R} = M \left[\dot{\xi}_{\text{пр}}(t) \dot{\xi}_{\text{пр}}^H(t - \tau) \right] = A^2 \mathbf{w} \mathbf{w}^H + N_0 \delta(\tau). \quad (10)$$

Из (10) видно, что аргументы элементов корреляционной матрицы (КМ) \mathbf{R} определяются множителем $\mathbf{w} \mathbf{w}^H$. Рассмотрим $\mathbf{w} \mathbf{w}^H$ для $m = 4$ (4-элементная АР):

$$\mathbf{w} \mathbf{w}^H = \begin{bmatrix} 1 & e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} & e^{j(\varphi_1 - \varphi_3)} & e^{j(\varphi_1 - \varphi_4)} \\ e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} & 1 & e^{j(\varphi_2 - \varphi_3)} & e^{j(\varphi_2 - \varphi_4)} \\ e^{j(\varphi_3 - \varphi_1)} & e^{j(\varphi_3 - \varphi_2)} & 1 & e^{j(\varphi_3 - \varphi_4)} \\ e^{j(\varphi_4 - \varphi_1)} & e^{j(\varphi_4 - \varphi_2)} & e^{j(\varphi_4 - \varphi_3)} & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

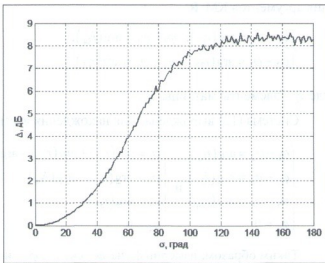


Рис. 1. График зависимости потерь в ОСШ от СКО фаз в различных РЧ-трактах

Видно, что аргументы КМ $\hat{\mathbf{R}}$ равны разности фазовых набегов в различных РЧ трактах. Измерив корреляционную матрицу при воздействии на АР зенитного гармонического сигнала можно найти фазовые набег $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$, определяющие неидентичность трактов, и компенсировать их при дальнейшей обработке.

Запишем систему уравнений относительно $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ для $m=4$, используя любые 4-е измерения аргументов КМ $\hat{\mathbf{R}}$.

$$\begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 = \arg(\hat{r}_{12}); & \varphi_3 - \varphi_4 = \arg(\hat{r}_{34}); \\ \varphi_2 - \varphi_3 = \arg(\hat{r}_{23}); & \varphi_1 - \varphi_4 = \arg(\hat{r}_{14}), \end{cases} \quad (12)$$

где \hat{r}_{ij} – элементы матрицы $\hat{\mathbf{R}}$.

Система (12) вырождена. Для нахождения частного решения полагаем $\varphi_4 = 0$, тогда

$$\begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 = \arg(\hat{r}_{12}) \\ \varphi_2 - \varphi_3 = \arg(\hat{r}_{23}) \\ \varphi_3 - \varphi_4 = \arg(\hat{r}_{34}) \\ \varphi_4 = 0 \end{cases} \text{ и } \begin{cases} \varphi_1 = \arg(\hat{r}_{12}) + \arg(\hat{r}_{23}) + \arg(\hat{r}_{34}) \\ \varphi_2 = \arg(\hat{r}_{23}) + \arg(\hat{r}_{34}) \\ \varphi_3 = \arg(\hat{r}_{34}) \\ \varphi_4 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, измерив фазы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$, и используя алгоритм пространственной обработки

$$\hat{\mathbf{b}}_k = \hat{\mathbf{M}}_{\text{тр}} \hat{\mathbf{H}}(\alpha_c), \quad (14)$$

где $\hat{\mathbf{M}}_{\text{тр}}$ – оценка матрицы искажений по измерениям фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$, можно компенсировать влияние неидентичности РЧ трактов НАП при фокусировки луча ДН АР в заданном направлении.

Запишем сигнал на выходе модуля ПОС при использовании ВВК (14):

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{вых}}(t) &= \hat{\mathbf{b}}_k^H \hat{\mathbf{S}}_{\text{тр}}(t) = \hat{\mathbf{H}}^H(\alpha_c) \hat{\mathbf{M}}_{\text{тр}}^H \hat{\mathbf{S}}_{\text{тр}}(t) = \\ &= \hat{\mathbf{H}}^H(\alpha_c) \mathbf{M}_{\text{тр}}^H \mathbf{M}_{\text{тр}} \hat{\mathbf{H}}(\alpha_c) \hat{S}_n(t, \lambda) + \hat{n}'_{\text{вых}}(t) = c \hat{S}_n(t, \lambda) + \hat{n}'_{\text{вых}}(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где c – вещественная константа; $\hat{n}'_{\text{вых}}(t)$ – эквивалентный комплексный шум.

Из (15) видно, что при использовании ВВК (14) фаза полезного сигнала после обработки не искажается.

Измерение фазовой неидентичности РЧ трактов в алгоритме калибровки проводится для случая, когда на АР воздействовал зенитный гармонический сигнал. Такие измерения были бы справедливы, если бы навигационный сигнал состоял из одной гармоники. Поскольку навигационный сигнал полосовой, и измерение фазовой неидентичности РЧ трактов корректно проводить в полосе навигационного сигнала, используя для этого зенитный шумовой сигнал (БГШ) с заданной полосой.

Этапы алгоритма калибровки

- Оценка корреляционной матрицы при приеме зенитного шумового сигнала и измерение фазовых неидентичностей РЧ трактов, используя (13).
- Использование ВВК (14) для компенсации неидентичности РЧ трактов и формирования максимума ДН АР в заданном направлении.

Экспериментальные результаты. Рассмотрим результаты экспериментального исследования функционирования предложенного алгоритма, целью которых ставится количественная оценка улучшения/ухудшения ОСШ на выходе блока ПОС при использовании алгоритма фокусировки (14), анализ точности фокусировки ДН АР в заданном направлении.

Методика проведения экспериментального исследования. Исследование проводится в безэховой камере на макете помехозащищенного навигационного приемника, подключенного к АР.

Испытуемый приемник настраивается на прием навигационных сигналов без воздействия помеховых сигналов. Для проведения исследований используются навигационные сигналы системы ГЛОНАСС. Поскольку в ГЛОНАСС применяется частотное разделение сигналов, калибровку РЧ трактов необходимо проводить для каждого навигационного сигнала отдельно, в диапазоне частот передачи сигнала.

Используя алгоритм (14), оператор сканирует лучом ДН АР пространство камеры и фиксирует при этом ОСШ для выбранного сигнала по всем направлениям.

Для анализа улучшения/ухудшения ОСШ на выходе блока ПОС при использовании алгоритма полученные результаты сравниваются с ОСШ при приеме сигнала на один из АЭ, для которого ОСШ для выбранного сигнала будет максимальным.

Результаты исследования работы алгоритма калибровки. Исследования проводились по предложенной методике в безэховой камере ЗАО КБ «НАВИС» на макетном образце помехозащищенной НАП, разработанной в рамках ОКР «Горизонт-Н». Для приема навигационных сигналов использовалась квадратная 4-элементная АР диапазона L1 ГЛОНАСС. Расстояние между антенными элементами $d = \lambda_0/2$, ($\lambda_0 = 0,187$ м).

Ниже приведены угловые координаты передающих спиральных антенн в безэховой камере.

№ антенны	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол места θ , град	33	48,6	37,7	44	33	41	40	45,7
Угол азимута α , град	270	225	181	138,6	90	40	1,5	320,6

Калибровка РЧ-трактов приемника проводилась отдельно для каждого из спутниковых сигналов, участвовавших в сценарии, по литерным частотам (диапазон L1 ГЛОНАСС). Для калибровки использовался шумовой сигнал на центральной частоте с полосой 1 МГц и мощностью минус 20 дБм. При проведении исследования оператор, используя алгоритм, сканировал пространство БЭК лучом ДН и фиксировал получаемые значения ОСШ для каждого углового направления. Такие измерения проводились для каждого сигнала.

Ниже приведены максимальные значения $q_{с/п0}$ (дБГц) при приеме сигнала на один АЭ и максимальные значения отношения $q_{с/п0}$, полученные при фокусировке.

Номер сигнала	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ОСШ, дБГц (прием на 1 АЭ)	40	42	40	41	41	42	42	40	40
ОСШ, дБГц (макс. значение при приеме на АР)	45	47	45	46	46	47	47	43	45
Δ , дБ	5	5	5	5	5	5	5	3	5

Из приведенных данных видно, что практически для всех спутников выигрыш в энергетике за счет формирования луча ДН в направлении прихода сигнала составил 5 дБ. Полученные результаты с высокой точностью соответствуют теоретическим. Максимальный теоретический выигрыш при использовании 4-элементной АР составляет $10 \log(4) \approx 6$ дБ.

На рис. 2 приводится типичный вид измеренной поверхности $q_{с/п0}(\theta, \alpha)$, полученный для одного из навигационных сигналов.

Из рисунка видно, что глобальный максимум по углу места оказывается широким ($\theta = 1 \dots 50$ град), из-за чего оценивать точность фокусировки луча вдоль координаты θ не представляет интереса. Поэтому при анализе точности фоку-

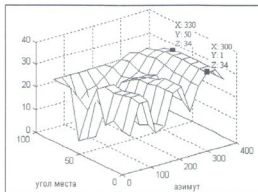


Рис. 2. Зависимость ОСШ от направления фокусировки луча

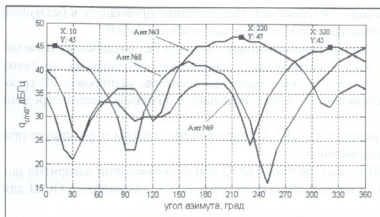


Рис. 3. Графические зависимости ОСШ от направления фокусировки луча по углу азимута

точность фокусировки луча ДН АР в заданном направлении при использовании предложенного алгоритма калибровки составляет порядка единиц градусов, что много меньше ширины максимума ДН.

Предложенная методика калибровки фазовых неоднородностей РЧ трактов позволяет эффективно использовать алгоритмы формирования максимума ДН АР в заданном направлении, а так же алгоритмы помехоподавления, работающие по критерию максимума ОСШ на выходе блока ПОС. Применение изложенной методики в реальной НАП предполагает обязательную предварительную калибровку, после чего возможно использование интересующего алгоритма с фокусировкой луча ДН АР. На примере алгоритма формирования максимума ДН АР в заданном направлении проводилось экспериментальное исследование работы предложенной методики калибровки, подтвердившее ее достоверность и работоспособность. Энергетический выигрыш в ОСШ на выходе блока ПОС при использовании предложенного алгоритма для 4-элементной АР составил 5 дБ по сравнению со случаем, когда полезный сигнал принимался на один АЭ. При этом точность формирования максимума ДН АР в заданном направлении составляет порядка единиц градусов.

Литература

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника. 2003.
2. Монинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию/ Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1986.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1989.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника. 2005.

сировки луча будем рассматривать изменения $q_{c/in0}$ только вдоль координаты α при заданном угле места θ , т.е. зависимость $q_{c/in0}(\alpha|\theta)$.

На рис. 3 приведены графические зависимости $q_{c/in0}(\alpha|\theta = 45^\circ)$ для трех навигационных сигналов, которые излучаются передающими антеннами №№ 3, 8, 9.

Координаты глобальных максимумов зависимости $q_{c/in0}(\alpha|\theta = 45^\circ)$ (рис. 3) совпадают с угловыми координатами передающих антенн (табл. 1.) с точностью порядка единиц градусов. Следовательно,

Радиолокация
и радиометрия

Методы и средства
оптоэлектроники
в радиофизике

Системы
радиоуправления

Антенны и техника СВЧ

Робототехника

Биомедицинская
электроника

Технологии
живых
систем

Новые
информационные
технологии

Нейрокомпьютинг

Нанотехнологии

Информационные
и измерительные
системы

Радионавигационные технологии



УДК 629.78
ББК 39.67
П 15

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕРИИ

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. О.В. Бешкий, 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

Выпуск 4

Серия «Радиосвязь и радионавигация»

Рецензент:

докт. техн. наук, профессор *В.Н. Харисов* (ОАО «ВНИИР Прогресс»)

П 15 Радионавигационные технологии. Сб. статей. / Под ред. *А.И. Перова*. – М.: Радиотехника, 2015. – 144 с.: ил. Научно-технические серии. Вып. 4. Серия «Радиосвязь и радионавигация». (Авторы указаны на с. 144)

ISBN 978-5-93108-096-3

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 2014 г.).
Для научных работников и инженеров, а также преподавателей и студентов вузов.

УДК 629.78
ББК 39.67

ISBN 978-5-93108-096-3

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015