

УДК 621.396.969.18

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА АППРОКСИМАЦИИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

М.В. Миронов, Е.П. Ворошилин, А.А. Мещеряков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: mironov.mikhail.v@gmail.com; nvi@sibmail.com; msch@ms.tusur.ru

Предложен способ аппроксимации диаграммы направленности многолучевой антенной системы, используемой для амплитудного пеленгования наземных источников радиоизлучения. Проведено математическое моделирование алгоритма аппроксимации, сравнение нескольких алгоритмов аппроксимации и экспериментальная проверка предложенного алгоритма при аппроксимации диаграммы направленности трехлучевой параболической антенны.

### Ключевые слова:

Диаграмма направленности, аппроксимация, функция Котельникова, параболическая антенна, облучатель, спиральная антенна, сканирование.

### Key words:

Antenna pattern, approximation, Kotelnikov's function, parabolic antenna, antenna feed, helical antenna, scanning.

### Введение

Основной целью работы пассивной космической системы радиомониторинга является выявление несанкционированных источников излучения в широком радиодиапазоне, начиная от радиолокационных станций различного базирования и заканчивая спутниковыми телефонами, а также определение координат и параметров движения выявленных источников. Для вычисления координат объекта на практике применяют три основных метода: пеленгационный [1], разностно-дальномерный [2], доплеровский [3]. Каждый из перечисленных методов позволяет решить задачу определения координат источника радиоизлучения при условии выполнения ряда требований.

Космические аппараты систем радиомониторинга обычно размещают на геостационарных и высокоэллиптических орбитах, а для определения координат объекта применяют амплитудные пеленгационные методы. Исходными данными при вычислении пеленга на источник излучения является форма диаграммы направленности (ДН) антенной системы, которая должна быть задана в виде аналитической функции. Отклонение реальной диаграммы направленности антенной системы от заложенной в алгоритм расчета приводит к ошибке пеленгования.

### Постановка задачи

Антенны, устанавливаемые на космические аппараты систем мониторинга, выполняются в виде параболического зеркала диаметром от единиц до десятков метров [4]. Обычно диаграммы направленности элементов антенной системы космических аппаратов обмеряются на Земле до вывода аппарата на орбиту. После запуска и вывода аппарата на орбиту зеркало антенной системы разворачивается и растягивается при помощи специальных двигателей. В условиях космического пространства могут наблюдаться существенные отклонения формы зеркала от расчетных значений, вследствие чего происходит искажение формы ДН.

Одним из способов уменьшения ошибки пеленгования, возникающей за счет отличия реальных ДН от идеальных, является нахождение формы реальной ДН. С этой целью используют наземные контрольно-юстировочные станции. Для повышения точности оценки формы реальной ДН необходимо произвести большое число измерений, что не всегда возможно. На практике поступают следующим образом: проводят измерение в нескольких точках, а затем по измеренным значениям аппроксимируют форму диаграммы антенной системы.

### Алгоритм аппроксимации формы диаграммы направленности

Двумерная ДН антенной системы  $s(\alpha, \varepsilon)$  допускает представление в виде разложения в ряд по совокупности функций  $f_{ij}(\alpha, \varepsilon)$  [5–7]:

$$s(\alpha, \varepsilon) = \sum_{i=0}^{N_{\text{узл}}} \sum_{j=0}^{N_{\text{узл}}} \lambda_{ij} f_{ij}(\alpha, \varepsilon) + n(\alpha, \varepsilon), \quad (1)$$

где  $\lambda = \begin{Bmatrix} \lambda_{00} & \lambda_{01} & \dots & \lambda_{0N_{\text{узл}}} \\ \lambda_{10} & \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1N_{\text{узл}}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{N_{\text{узл}}0} & \lambda_{N_{\text{узл}}1} & \dots & \lambda_{N_{\text{узл}}N_{\text{узл}}} \end{Bmatrix}$  – матрица неиз-

вестных коэффициентов ряда размерностью  $N_{\text{узл}} \times N_{\text{узл}}$ ;  $\alpha$  – азимут;  $\varepsilon$  – угол места;  $N_{\text{узл}}$  – количество узловых точек, которое определяется количеством функций в базе;  $f_{ij}(\alpha, \varepsilon)$  – базис заданных функций;  $n(\alpha, \varepsilon)$  – аддитивная помеха.

Задача аппроксимации ДН антенной системы сводится к нахождению оптимальной оценки весовых коэффициентов  $\hat{\lambda}_{ij}$  в выражении (1) при условии, что данные поступают в дискретные моменты времени. Для простоты обработки ДН необходимо представить данные в виде вектор-столбца размером  $N^2 \times 1$ , а не в виде матрицы размером  $N \times N$ . Матрицу неизвестных коэффициентов  $\hat{\lambda}$  также необходимо представить в виде вектор-столбца

размерностью  $N_{\text{уэл}}^2 \times 1$ . Для этого все строки матрицы записывают в одну строку друг за другом, а затем транспонируют полученную строку в вектор-столбец.

В матричном виде система может быть представлена в виде:

$$\mathbf{s} = \mathbf{F}\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{s}$  –  $N^2$ -мерный вектор-столбец наблюдений;  $\mathbf{n}$  –  $N^2$ -мерный вектор-столбец помехи;  $\mathbf{F}$  – матрица размера  $N^2 \times N_{\text{уэл}}^2$ .

Допустим, что  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  есть оценка коэффициентов ряда разложения, тогда из выражения (2) выразим вектор-столбец помехи:

$$(\mathbf{s} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\lambda}}) = \tilde{\mathbf{n}},$$

где  $\tilde{\mathbf{n}}$  – вектор остаточной помехи.

Критерий оптимальности для оценок по методу наименьших квадратов (МНК) определяется выражением:

$$J(\hat{\boldsymbol{\lambda}}) = (\mathbf{s} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\lambda}})^T \mathbf{R}(\mathbf{s} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\lambda}}),$$

где  $\mathbf{R}$  – положительно определенная симметричная матрица весовых коэффициентов.

Для оптимальной оценки неизвестных параметров по методу наименьших квадратов должно выполняться условие [7, 8]:

$$J(\hat{\boldsymbol{\lambda}}_{\text{МНК}}) = \min_{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} [J(\hat{\boldsymbol{\lambda}})].$$

Таким образом, если искомая оценка существует, то она может быть определена как корень уравнения:

$$\left. \frac{\partial J(\hat{\boldsymbol{\lambda}})}{\partial \hat{\boldsymbol{\lambda}}} \right| = \min_{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} [J(\hat{\boldsymbol{\lambda}})].$$

Выражение для оценки вектора неизвестных коэффициентов  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  методом наименьших квадратов может быть получено из выражения [7, 8]:

$$\mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{s} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{F}) \hat{\boldsymbol{\lambda}}.$$

В итоге для оценки  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  получим выражение [7]:

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}}_{\text{МНК}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{s}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что оптимальная оценка  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  неизвестных параметров  $\lambda_i$ , полученная методом наименьших квадратов, находится в результате линейной операции над входными данными  $\mathbf{s}$ .

Используя выражение (3), получим оценку  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  вектора коэффициентов ряда разложения. Аппроксимация ДН антенной системы происходит следующим образом:

$$Y_{\text{анпр}}(\alpha, \varepsilon) = \sum_{i=0}^{N_{\text{уэл}}} \sum_{j=0}^{N_{\text{уэл}}} \hat{\lambda}_{ij} f_{ij}(\alpha, \varepsilon), \quad (4)$$

где  $Y_{\text{анпр}}(\alpha, \varepsilon)$  – аппроксимированная диаграмма направленности антенной системы.

После аппроксимации по формуле (4) получаем вектор-столбец размером  $N^2 \times 1$ , который впоследствии преобразуется в матрицу размером  $N \times N$ . Бы-

ло проведено математическое моделирование процесса аппроксимации ДН антенны, заданной аналитической функцией. Результаты исследования приведены в работе [9]. В настоящей статье рассматривается процесс аппроксимации ДН реальной антенной системы, полученной при проведении экспериментальных исследований.

#### Методика проведения эксперимента и описание аппаратуры

Проверка предложенного алгоритма аппроксимации проводилась по экспериментально измеренным диаграммам направленности трехлучевой параболической антенны. Экспериментальные исследования форм ДН лучей трехлучевой антенны выполнялись на наземной трассе на территории полигона Научно-исследовательского института радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (НИИ РТС ТУСУР).

Для экспериментального исследования направленных свойств антенны на полигоне использовался специальный участок – антенный испытательный стенд, на котором размещена деревянная мачта высотой 12 м с площадкой для передающей аппаратуры и помещение с приемной и регистрирующей аппаратурой.

Расстояние между приемным и передающим пунктами стенда 108 м. Между ними – покрытый травой участок полигона с углублением в его середине. Перепад высот участка у приемного и передающего пунктов составляет 3,7 м. Левая сторона участка выше правой с общим наклоном 6,8° относительно горизонтальной плоскости. На расстоянии 20...30 м справа и слева от линии приемник-передатчик растут деревья.

В качестве источника излучения использовался генератор сигналов высокой частоты Г4-83 с интегральным усилителем М42224 (производства ОАО «Октава» г. Новосибирск), обеспечивающим мощность 1 Вт. Источник излучал радиоимпульсы длительностью 500 нс на частоте 9,6 ГГц. В качестве антенны источника излучения использовалась параболическая антенна диаметром 1,2 м из комплекта наземной разведывательной станции НРС-1. Конструкция крепления облучателей этой антенны позволяла использовать «поворотные» секции для смены поляризации излученного сигнала.

Исследуемая трехлучевая параболическая антенна размещалась на поворотном устройстве от станции разведки НРС-1, расположенном на высоте 4 м от уровня земли. Внешний вид трехлучевой параболической антенны показан на рис. 1. Основные параметры антенны следующие: фокусное расстояние – 450 мм; диаметр основного зеркала – 1200 мм; коэффициент усиления – 36 дБ.

Внешний вид облучателя, состоящего из трех спиральных антенн, вынесенных из фокуса, с помощью которого создаются три луча, приведен на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид трехлучевой параболической антенны

Структурная схема приемно-регистрирующей аппаратуры приведена на рис. 3. Выходы трехлучевой антенны подключены к смесителям блока сверхвысокой частоты (СВЧ). Частота СВЧ генератора 9,15 ГГц, таким образом, промежуточная частота сигнала на выходе каждого смесителя СВЧ составляла 450 МГц. С выходов смесителей СВЧ сигналы поступают в блок промежуточной частоты (ПЧ). Частота опорного генератора, сигнал которого подается на каждый канал ПЧ, составляет 450 МГц. После переноса частоты сигнала в область нулевой частоты сигнал в каждом канале раскладывается на две квадратурные составляющие (I и Q), которые поступают на входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП). АЦП тактируются и запускаются двумя сигналами с частотами

2 кГц и 80 МГц соответственно. Данные в цифровом виде поступают в память ПЭВМ. ПЭВМ предназначена для управления всей приемно-регистрающей аппаратурой.



Рис. 2. Внешний вид облучателя трехлучевой параболической антенны

Во время измерений антенна источника излучения максимумом ДН была ориентирована на исследуемую антенну.

Измерения ДН исследуемой антенны проводилось при сканировании в секторе углов от  $-7,8$  до  $+7,8^\circ$  в азимутальной плоскости относительно основного направления при фиксированных углах места. Для измерения объемной ДН антенны угол места изменялся в пределах от  $-5$  до  $+5^\circ$  с шагом  $0,5^\circ$ .

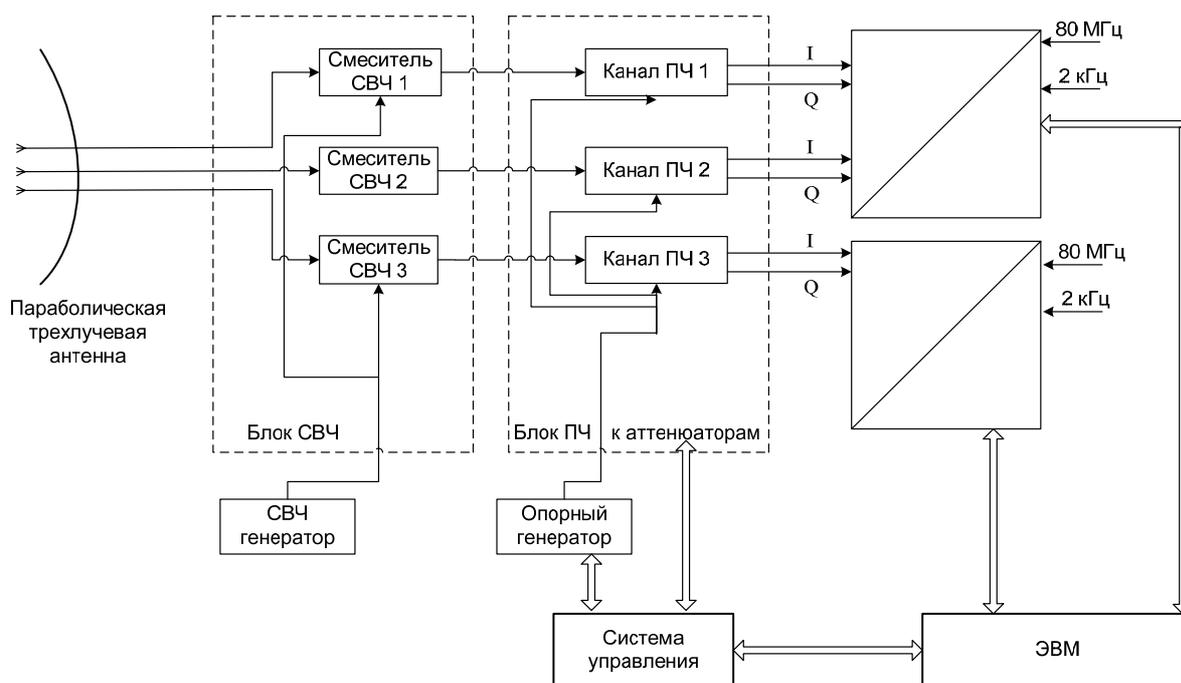


Рис. 3. Структурная схема приемно-регистрирующей аппаратуры

За время сканирования в азимутальной плоскости приемная аппаратура позволяла регистрировать в цифровом виде квадратурные составляющие принимаемого импульсного сигнала с тактом 12 нс. Всего за время сканирования регистрировалось 1500 импульсов. Каждому зарегистрированному импульсу соответствовало отклонение исследуемой антенны в азимутальной плоскости на угол  $0,01^\circ$ . Результаты измерений в виде восьмизрядных чисел записывались в память ПЭВМ.

В процессе обработки результатов измерений по квадратурным составляющим восстанавливалась амплитуда сигналов на выходах отдельных лучей антенны. Запись данных в память ПЭВМ производилась во временном окне, положение которого относительно момента излучения сигнала источника устанавливалось с помощью системы синхронизации.

#### Обработка экспериментальных данных

На рис. 4. приведена ДН одного луча антенной системы, полученная по результатам измерений. Диаграмма направленности того же луча антенной системы, аппроксимированная согласно выражению (4), приведена на рис. 5. Вид абсолютной ошибки аппроксимации приведен на рис. 6. Аппроксимированная ДН антенной системы, состоящая из трех лучей, приведена на рис. 7.

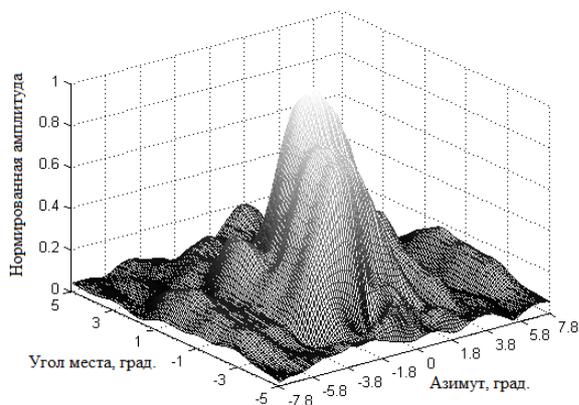


Рис. 4. ДН одного луча трехлучевой параболической антенны

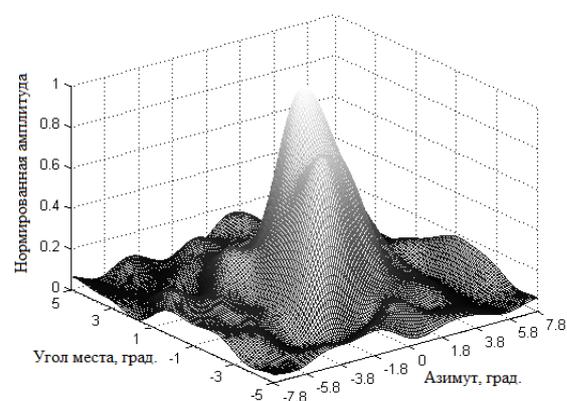


Рис. 5. Аппроксимированная ДН одного луча трехлучевой параболической антенны

Ошибка аппроксимации аналитически заданной диаграммы направленности составляет 1 % [9], а экспериментально измеренной – 10 %. Связано это с тем, что форма диаграммы направленности реальной антенной системы сильно искажена по сравнению с аналитически рассчитанной диаграммой для той же антенной системы. Причиной этого может являться как искажения формы зеркала, так и погрешность изготовления облучателя.

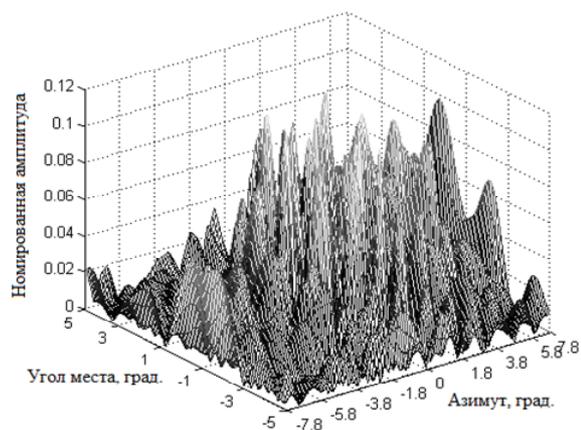


Рис. 6. Абсолютная ошибка аппроксимации

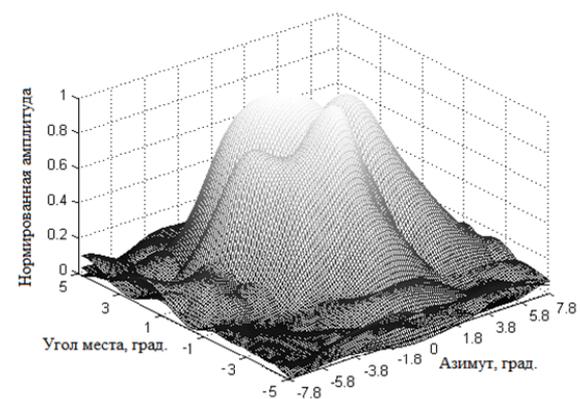


Рис. 7. Аппроксимированная ДН антенной системы

#### Сравнение алгоритмов аппроксимации

Для получения статистической оценки погрешности аппроксимации ДН реальной антенной системы было проведено сравнение нескольких алгоритмов: предложенного алгоритма; алгоритма, использующего быстрое преобразование Фурье; алгоритма Барнеса [10]; алгоритма аппроксимации сплайн-функциями [11]. В качестве параметра для сравнения было выбрано среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибки аппроксимации. На рис. 8 приведены зависимости СКО ошибки аппроксимации ДН разными алгоритмами от уровня, на котором производилась аппроксимация, отношение сигнал/шум составляло 14 дБ, а СКО вычислялось по 30 реализациям аппроксимации ДН антенны. На рис. 8 цифрой 1 обозначен предложенный метод, 2 – метод Барнеса, 3 – метод Фурье аппроксимации, 4 – аппроксимация сплайнами.

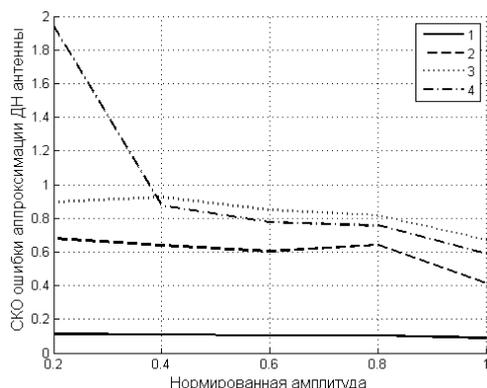


Рис. 8. Зависимость СКО ошибки аппроксимации от уровня

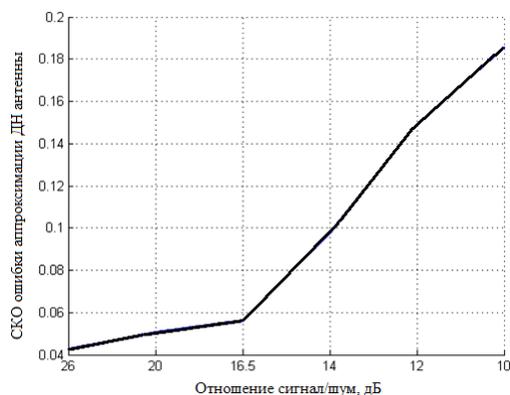


Рис. 9. Зависимость СКО ошибки аппроксимации от отношения сигнал/шум

Сравнение нескольких алгоритмов аппроксимации показало, что предложенный алгоритм позволяет аппроксимировать диаграмму направленности с ошибкой, не превышающей 10 % от максимального уровня диаграммы направленности, во всем диапазоне амплитуд при отношении сигнал/шум 14 дБ. Погрешность остальных методов больше погрешности предложенного от 40 до 60 % в области главного лепестка диаграммы (уровень

0,8...1,0 от максимального значения), а за пределами этой области ошибка доходит до 100 %.

Для предложенного алгоритма получена зависимость СКО ошибки аппроксимации ДН антенны от отношения сигнал/шум, которая приведена на рис. 9. Под отношением сигнал/шум понимается отношение максимального значения ДН антенны к СКО шума. Вычисление СКО ошибки производилось при аппроксимации ДН на уровне 0,6...0,8 от максимального значения по 30 реализациям ДН антенны. При юстировке антенн типовое отношение сигнал/шум достигает 20...30 дБ, при этом ошибка аппроксимации не превышает 5 %.

### Выводы

1. Предложен алгоритм аппроксимации диаграммы направленности многолучевой антенной системы амплитудной пеленгации наземных источников радиоизлучения.
2. Проведено математическое моделирование алгоритма и его сравнение с классическими алгоритмами аппроксимации, выполнена экспериментальная проверка алгоритма для трехлучевой параболической антенны.
3. Доказано, что для повышения точности алгоритма пеленгации источников радиоизлучения необходима аналитическая запись реальной диаграммы направленности антенной системы.
4. Ошибка аппроксимации экспериментально измеренной диаграммы направленности по результатам измерений в нескольких точках не превышает 10 %.
5. Показано, что точность предложенного алгоритма выше на 100...500 % при незначительном увеличении вычислительных затрат по сравнению с методами Барнеса, Фурье, аппроксимации сплайнами.

Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Государственный контракт № 02.740.11.0183).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2001. – 251 с.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
3. Скольник М.И., Трофимов К.Н., Ицхок Я.С. Справочник по радиолокации. Основы радиолокации: справочное издание. – М.: Советское радио, 1976. – 456 с.
4. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
5. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2005. – 604 с.
7. Тисленко В.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 153 с.
8. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1989. – 439 с.
9. Миронов М.В., Ворошилин Е.П. Способ аппроксимации диаграммы направленности антенной системы космического аппарата по сигналам наземной контрольно-юстировочной станции // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 1. – С. 213–219.
10. Barnes S.L. Applications of the Barnes objective analysis scheme. P. I: Effects of undersampling, wave position, and station randomness// J. of Atmos. and Oceanic Tech. – 1994. – V. 11. – P. 1433–1448.
11. De Boor C. A Practical Guide to Splines. – N.Y.: Springer-Verlag, 1978. – 318 p.

Поступила 13.10.2010 г.