Способы повышения эффективности бортовых средств радиомониторинга наземных источников радиоизлучения за счет применения антенных решеток

Methods of increase in efficiency of onboard equipment of radio monitoring of a radio emission land-based sources due to the antenna arrays using

Кузнецов / Kuznetsov A.
Александр Семенович
(a.kuznetsov@scaegroup.com)
кандидат технических наук, доцент.
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
главный конструктор радиоэлектронных средств.
г. Санкт-Петербург

Славянский / Slavyanskiy O.
Олег Евгеньевич
(o.slavyanskiy@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
начальник отдела обработки сигналов.
г. Санкт-Петербург

Хабиров / Khabirov D.
Денис Олегович
(d.khabirov@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
заместитель начальника отдела антенно-фидерных устройств.
г. Санкт-Петербург

Бокучава / Bokuchava P.
Петр Нугзариевич
(p.bokuchava@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
инженер-конструктор 1-й категории отдела комплексных средств.
г. Санкт-Петербург

Гладуш / Gladush A.
Андрей Игоревич
(andrei.gladush@scaegroup.com)
АО «Научный центр прикладной электродинамики»,
инженер-программист отдела обработки сигналов.
Г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: радиопеленгатор – radio direction finder; антенная решетка – antenna array; суммирование косинусоид – the cosine wave sum.

Предложены два способа повышения эффективности космического фазового радиопеленгатора: за счет применения линейных антенных решеток в качестве антенных элементов пеленгатора, а также за счет использования кольцевых антенных решеток. Рассмотрен вопрос обработки сигналов с учетом вида сигнала.

Two methods of satellite phase direction-finder efficiency increasing have been suggested: by using of line antenna array as direction-finder antenna elements, and by applying of ring antenna arrays. Signal processing task has been analyzed taking into account the type of signal.

Постановка задачи

В целях обозначения мест аварий и крушений самолетов, вертолетов, морских судов широко используются радиомаяки, сигналы от которых фиксируются космическими системами радиомониторинга типа КОСПАС-САРСАТ. Однако не всегда радиомаяки срабатывают штатно, например после аварии могут оказаться на большой глубине или под фрагментами объекта, экранирующими излучение радиомаяка.

При анализе развития ситуации, приведшей к аварии, либо при поиске исчезнувшего воздушного судна определенный интерес представляет информация о траектории движения объекта. Большинство подвижных объектов оборудовано всевозможными радиоэлектронными средствами (РЭС): радиолокаторами кругового обзора, системами спутниковой связи и т.д., поэтому

4-2017.indd 44 12.12.2017 11:24:49

сигналы данных РЭС могут быть использованы для отслеживания траектории движения объекта.

Антенны упомянутых РЭС зачастую не предназначены для излучения в верхнюю полусферу. В связи с этим при размещении средств радиомониторинга на борту космического аппарата (КА) обнаруживать сигналы от РЭС необходимо по боковым лепесткам диаграмм направленности антенн, уровень сигнала в которых на 15–20 дБ ниже, чем в основном лепестке антенны РЭС. Кроме того, сигналы РЭС имеют специфическую форму, затрудняющую задачу их обнаружению и пеленгации.

В этой ситуации актуальной становится задача повышения чувствительности радиопеленгатора на борту КА. Так как возможности повышения чувствительности близки к достижимому пределу, то чувствительность радиопеленгатора может быть увеличена путем использования более направленных антенн, а также путем учета особенностей радиосигналов пеленгуемых РЭС.

Повышение чувствительности радиопеленгатора за счет применения антенных решеток

Одной из основных трудностей при построении антенных систем бортовых фазовых радиопеленгаторов является противоречивое требование обеспечения величины ширины диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ (обычно $\approx 60^\circ$) и величины коэффициента усиления (требования достигают 15...25 дБ). Действительно, не существует способа реализовать какую-либо антенну, которая могла бы одновременно в полной мере удовлетворять данным двум требованиям, т.к. эти две величины находятся в тесной взаимосвязи между собой.

В связи с этим необходимы реализации антенных систем, обеспечивающую выполнение указанных требований косвенными методами. Данные методы могут быть реализованы путем выбора определенного типа антенны с соответствующей диаграммообразующей схемой (ДОС).

Оптимальным, с точки зрения максимизации вероятности обнаружения сигнала РЭС в заданном секторе обзора, является вариант использования цифровых многоканальных антенных решеток, каждый канал которых содержит радиоприемник и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Выигрыш в чувствительности пеленгатора (по полю) при этом пропорционален количеству антенных элементов решетки и для приемлемых на практике размеров решетки может достигать 11–14 дБ.

Платой за улучшение чувствительности является существенное усложнение и удорожание пеленгатора. Например, переход от одиночных антенных элементов к антенным решеткам (АР) 4×4 в 8-элементном фазовом пеленгаторе потребует использования 128 приемных каналов с АЦП (вместо 8 каналов в пеленгаторе без антенных решеток).

Упростить схему пеленгатора можно, используя антенную решетку с электронным сканированием. В каждом канале устанавливается управляемый фазовращатель. Выигрыш по чувствительности пеленгатора по полю, как и в предыдущем случае, может достигать 11–14 дБ. Упрощенная схема такого радиопеленгатора показана на рис. 1.

Недостатком данной схемы является снижение вероятности обнаружения сигнала РЭС за счет последовательного перемещения луча в заданном секторе поиска.

Предлагается вариант использования специальным образом расположенных линейных синфазных антенных решеток для повышения чувствительности многобазового фазового пеленгатора. Схема пеленгатора отличается простотой в реализации и обеспечивает выигрыш в чувствительности до 7–9 дБ.

Такой результат достигается за счет применения в системе радиомониторинга, расположенной на борту КА, фазового радиопеленгатора с двумя ортогонально расположенными линейками антенн. При этом вместо одиночных антенных элементов (АЭ), характеризующимися диаграммой направленности с шириной $\approx 60^\circ \times 60^\circ$ и коэффициентом усиления (КУ) 7–9 дБ, используются линейные антенные решетки 1×8 элементов.

Переход от слабонаправленных одиночных АЭ к линейным АР (рис. 2), ширина ДН которых составляет $\approx 8^\circ \times 60^\circ$, (возможно также применение АР 1×4 либо 1×2 элементов) позволяет добиться повышения коэффициента усиления с 7–9 дБ до 15–17 дБ (за счет снижения времени обзора области пространства на Земле, что в случае непрерывно работающего РЭС не является существенным недостатком).

Бортовой вычислительный комплекс (БВК) производит измерение и обработку данных о разностях фаз сигналов, принятых одновременно всеми АР в одной линейке антенн. Дальнейшие вычисления, основанные, например, на методе суммирования косинусоид [1], позволяют получить информацию о пеленге на интересующий объект-источник радиоизлучения. Обработка данных от ортогонально расположенных линеек антенн происходит независимо, что в итоге дает информацию о пеленге в двумерном пространстве углов.

Построение антенной системы радиопеленгатора с использованием кольцевых антенных решеток

Помимо применения в бортовых фазовых радиопеленгаторах антенных систем в виде двух ортогонально расположенных линеек антенн, возможно также применение антенных систем других видов. Предлагается вариант использования кольцевых антенных решеток.

Измерение и обработка данных о разностях фаз сигналов, принятых АЭ, производится одновременно со всех антенных элементов. Таким образом, процедура вычисления пеленга позволяет сразу получить информацию о направлении на ИРИ в двумерном простран-

4-2017.indd 45 12.12.2017 11:24:49

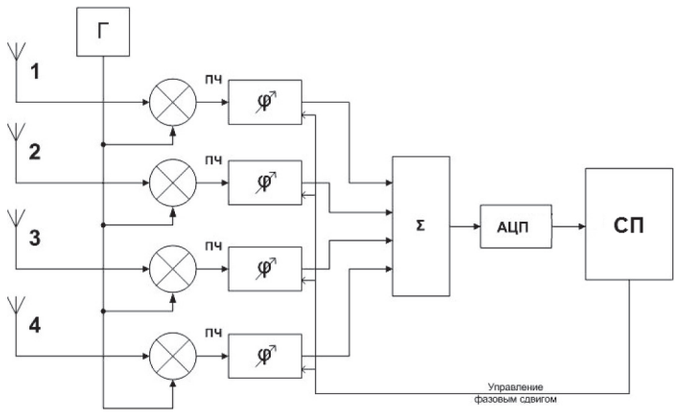

Рис. 1. Схема радиопеленгатора с электронным сканированием

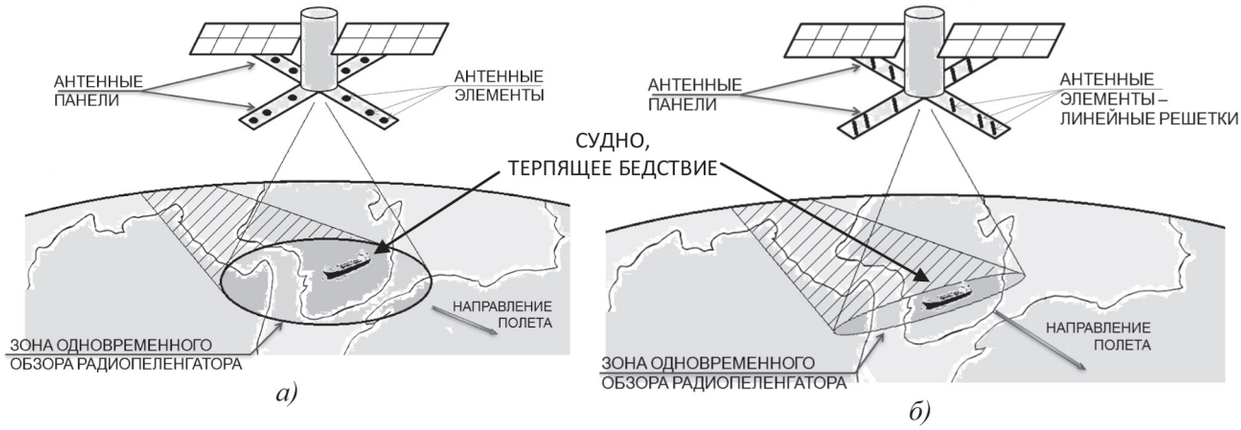

Рис. 2. Бортовой фазовый радиопеленгатор:
а) классический вариант; б) предлагаемый вариант

стве углов. Важно отметить, что применение кольцевых антенных решеток взамен двух ортогональных линеек антенн позволяет в целом сократить количество АЭ в антенной системе радиопеленгатора.

Алгоритм работы пеленгатора с антенной системой в виде кольцевой антенной решетки с N АЭ, основанный на методе суммирования косинусоид [2], сводится к следующему. На основе разностей фаз, измеренных во всех парах (фазометрических шкалах) смежных АЭ, вычисляются функции-косинусоиды, определенные в сферической системе координат:

Алгоритм работы пеленгатора с антенной системой в виде кольцевой антенной решетки с N АЭ, основанный на методе суммирования косинусоид [2], сводится к следующему. На основе разностей фаз, измеренных во всех парах (фазометрических шкалах) смежных АЭ, вычисляются функции-косинусоиды $F_i(\theta,\varphi)$ определенные в сферической системе координат:

$$F_i(\theta,\varphi)=\cos\left(2\cdot\pi\cdot n_i\cdot\cos\left(X(\theta,\varphi)\cdot\cos\alpha_i+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\,Y(\theta,\varphi)\cdot\sin\alpha_i\right)-\Delta\phi_i\right),$$

где: i – номер фазометрической шкалы по порядку, $i = 1 \ldots N$;

n_i – масштабные коэффициенты шкал ($n_i = L_i / \lambda$);

L_i – длины шкал;

α_i – углы между направлениями шкал и направлением начала отсчета азимута;

$\Delta\varphi_i$ – величины разностей фаз, измеренные на соседних шкалах;

$$X(\theta,\varphi)=\sin\theta\cdot\cos\varphi;\;\; Y(\theta,\varphi)=\sin\theta\cdot\sin\varphi.$$

Затем производится алгебраическое суммирование всех полученных функций-косинусоид. Искомый пеленг (значения углов θ,φ) на ИРИ вычисляется как аргумент функции-суммы косинусоид в точке, в которой данная функция принимает наибольшее значение:

$$[\theta,\varphi]=\arg\max\left(\sum_{i=1}^{N}F_i(\theta,\varphi)\right).$$

На рис. 3 представлена иллюстрация принципа вычисления пеленга (θ,φ) в пеленгаторе с антенной

4-2017.indd 46 12.12.2017 11:24:50

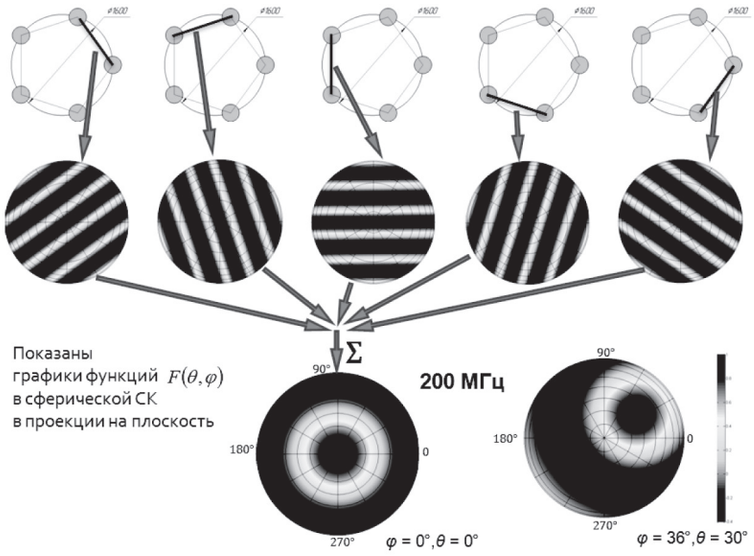

Рис. 3. Иллюстрация принципа вычисления пеленга

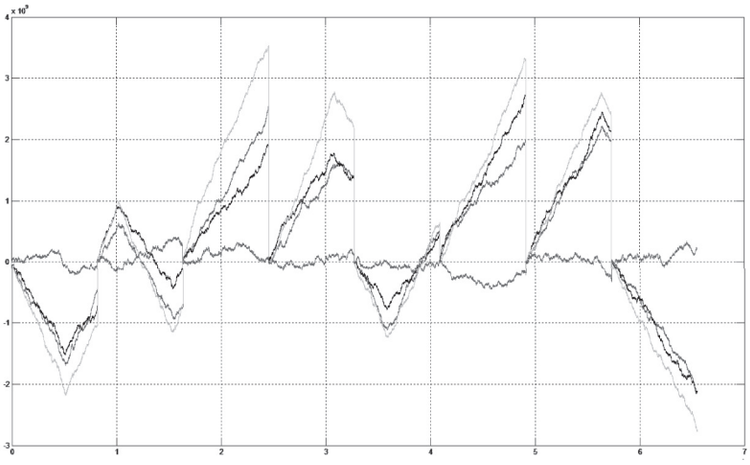

Рис. 4. Свертки сигналов в каналах приема и опорного сигнала.
(По оси X – номер отсчета, по оси У – свертка).
Уровень сигнал/шум = –20 дБ

4-2017.indd 47 12.12.2017 11:24:50

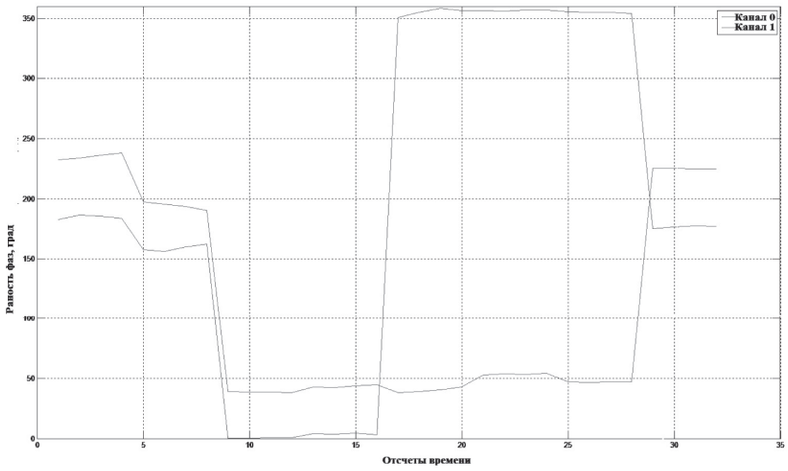

Рис. 5. Текущие разности фаз между сигналами в каналах приема и опорным сигналом. Уровень сигнал/шум = −20дБ

системой в виде кольцевой антенной решетки. В качестве примера приведены графики результата вычисления пеленга для ($\theta = 0°, \varphi = 0°$) и для ($\theta = 36°, \varphi = 30°$) на частоте 200 МГц. Диаметр кольцевой антенной решетки 1600 мм. Результаты получены путем математического моделирования.

Посредством правильного выбора диаметра окружности, по которой расположены АЭ, и количества АЭ, можно добиться соответствия характеристик радиопеленгатора следующим требованиям:

– точность определения пеленга (возрастает при увеличении диаметра АР);

– вероятность аномальных ошибок вследствие неоднозначности фазовых измерений (снижается при увеличении количества антенных элементов).

Обработка сигналов пеленгатора с учетом вида радиосигнала

Проведенное математическое моделирование и экспериментальная апробация алгоритмов показали, что определенного выигрыша в вероятности обнаружения сигнала и точности вычисления разности фаз можно добиться, если есть априорная информация о виде сигнала РЭС.

В случае если известно, что в данном диапазоне работают средства радиосвязи с квазинепрерывными сигналами, наиболее подходящим является алгоритм обработки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).

IP-ядро БПФ настраивается на режим конвейерной обработки данных, и выдает значение рассчитанных действительной и мнимой части числа, соответствующих составляющей амплитуды сигнала.

Посредством синхронного детектирования на выделенных частотах (перевод на нулевую частоту) определяются фаза в каждом канале, средняя мощность, тип манипуляции, параметры посылки.

По каждому выявленному сигналу выполняются следующие операции:

С помощью специального ядра ПЛИС формируется матрица значений синусов и косинусов сигнала на выбранной частоте. Производится вычисление свертки входных сигналов по каждому каналу АЦП с синхронными значениями синуса и косинуса (рис. 4). Определяются синус и косинус фазы каждого сигнала по графику свертки относительно сгенерированного опорного сигнала.

Вычисленные фазы для всех приемников используются для вычисления разности фаз, необходимых для расчета пеленга на источник радиоизлучения.

Для коротких сигналов использование аппарата БПФ для вычисления центральной частоты сигнала при сильных шумах (отношение сигнал/ шум ниже 0 Дб) не представляется возможным.

В этом случае для определения разности фаз предлагается использовать метод межканальной свертки. При этом малая длительность импульсов является основанием для базовой гипотезы о том, что на данном интервале наблюдается только один сигнал.

При свертке сигналов выполняются следующие операции:

$$S_1 \cdot S_2 = A\sin(\omega t) A\sin(\omega t + \varphi) =$$
$$= \frac{A^2}{2}\left(\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)\right)$$

Для того, чтобы убрать амплитуду из формулы производится свертка сигнала в любом канала самой с собой ($S_1 \cdot S_2$), которая дает $A^2/2$.

Для получения итогового значения разности фаз между каналами необходимо взять арккосинус от накопленных значений свертки.

На рис. 6 приведены СКО вычисления разности фаз в зависимости от отношения сигнал/шум (от −5Дб до

4-2017.indd 48 12.12.2017 11:24:51

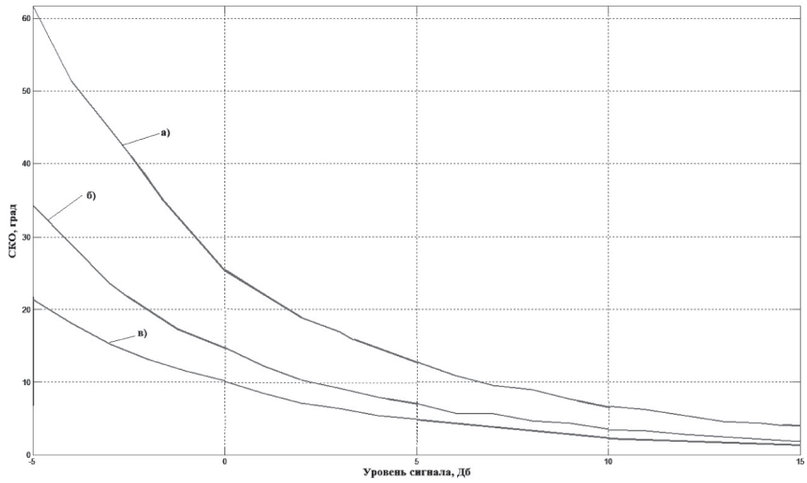

Рис. 6. Результаты расчетов СКО разностей фаз в зависимости от уровня сигнал/шум. Количество отсчетов а) 12, б) 32, в) 64

Исходные данные

70. 600

1 положение

Разности фаз периферийных антенн

1-2 => 115.7 = 170.7
2-3 => 167.2 = 33.7
3-4 => 218.6 = 128.6
4-5 => 270.0 = 105.2
5-6 => 321.4 = 86.3
6-7 => 12.9 = 147.1
7-1 => 64.3 = 90.2

Разности фаз периферийных и центральной антенны

1-0 => 0.0 = 106.9
2-0 => 51.4 = 63.8
3-0 => 102.9 = 97.5
4-0 => 154.3 = 31.1
5-0 => 205.7 = 136.3
6-0 => 257.1 = 49.9
7-0 => 308.6 = 162.9

Пеленги для пар антенн, выбранных по критерию MIN разности фаз

2 => 84.1 + 250.3
6 => 70.3 + 264.1

4 => 70.0 + 238.6
6 => 58.6 + 250.0

Парные пеленги 250.3 70.25

Исходные данные

57.8 666

2 положение

Разности фаз периферийных антенн

1-2 => 115.7 = 144.0
2-3 => 167.2 = 89.9
3-4 => 218.6 = 103.9
4-5 => 270.0 = 130.6
5-6 => 321.4 = 30.0
6-7 => 12.9 = 168.1
7-1 => 64.3 = 90.6

Разности фаз периферийных и центральной антенны

1-0 => 0.0 = 166.6
2-0 => 51.4 = 49.5
3-0 => 102.9 = 139.3
4-0 => 154.3 = 35.4
5-0 => 205.7 = 95.2
6-0 => 257.1 = 65.2
7-0 => 308.6 = 102.9

Пеленги для пар антенн, выбранных по критерию MIN разности фаз

5 => 237.6 + 45.3
2 => 225.3 + 57.6

4 => 70.8 + 237.8
2 => 57.8 + 250.8

Парные пеленги 237.6 57.57

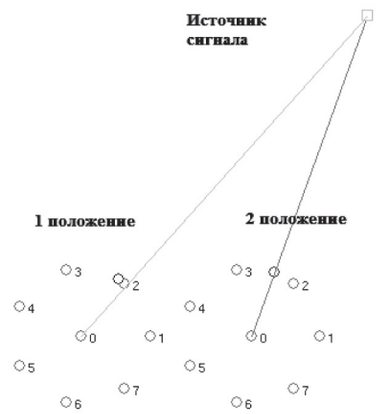

Рис. 7. Пеленгация источника импульсов с учетом движении фазового пеленгатора

4-2017.indd 49 12.12.2017 11:24:51

+15 Дб) для разного числа отсчетов импульса. Получены методом Монте-Карло по 1000 экспериментов.

Арккосинус не является однозначной величиной, поэтому для решения неоднозначности используется движение аппарата. Вычисляются пары для двух положений фазового пеленгатора. Выбираются пеленги, дающие точку пересечения в предметной плоскости (рис. 7).

Заключение

Предложены способы повышения эффективности космического фазового радиопеленгатора, используемого в качестве бортового средства радиомониторинга наземных ИРИ: за счет применения линейных антенных решеток в качестве антенных элементов пеленгатора, а также за счет использования кольцевых антенных решеток и учета вида радиосигнала.

Применение линейных синфазных антенных решеток в качестве антенных элементов фазового радиопеленгатора позволяет повысить коэффициент усиления при приеме сигналов РЭС, не сузив при этом полосу обзора на Земле.

Применение кольцевых антенных решеток взамен традиционной конфигурации в виде двух ортогональных линеек антенн позволяет в целом сократить количество АЭ в антенной системе радиопеленгатора.

В статье рассмотрен вопрос обработки сигналов с учетом вида сигнала.

Литература

1. Денисов, В. П. Фазовые радиопеленгаторы: Монография / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 416 с.

2. Белов, В. И. Теория фазовых измерительных систем: монография / В.И. Белов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 148 с.

4-2017.indd 50 12.12.2017 11:24:51