

Researches of time numbers by means of a SSA-method on the basis of complex application of tabulated processor MS Excel, mathematical package Mathcad, statistical packages Minitab and Statistica are carried out. It is shown, that a noise component restored of some for uniform, exponential and normal distribution it is displaced aside zero on size of a mean of a noise component initial of some with a margin error up to 6 % and increases up to 30 % at growth of a variance of noise initial of some up to 25 times. The standard deviation a noise component restored of some differs from initial on 7–9 % in all cases.

УДК 621.391:51-74+621.396.91/.96

Поляков В.И., Дереченник С.С., Стрибук А.М.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ УГЛОВЫХ РАЗРЕШЕНИЙ И ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Введение. Угловые измерения (измерения угловых координат объекта) основаны на определении положения волнового фронта отраженной, параизлученной или излученной электромагнитной волны, относительно апертуры (раскрыва) приемной антенны радиоэлектронного средства (РЭС). Этот процесс называется *пеленгацией*, а соответствующие измерители – пеленгаторами, которые могут быть одно- или многоканальными.

Остановимся на одноканальных пеленгаторах, использующих периодическую последовательность радиоимпульсов и последовательный обзор пространства с постоянной угловой скоростью сканирования. Для данного случая полезный сигнал, несущий информацию об угловом положении Θ наблюдаемого объекта, представляет собой пачку из некоторого количества радиоимпульсов, огибающая которой модулирована результирующей диаграммой направленности (ДН) антенны $F(\Theta)$. Таким образом, задача состоит в извлечении полезной информации (угловой координаты Θ) по принятой когерентной пачке радиоимпульсов на фоне гауссовых помех.

Алгоритм оптимального измерения угловой координаты. В задаче измерения параметров сигнала принятое колебание $y(t)$ содержит аддитивную смесь полезного сигнала $x(t, \Theta)$ и помехи $n(t)$:

$$y(t) = x(t, \Theta) + n(t), \quad (1)$$

где параметр Θ – случайная величина.

Поскольку полезная информация содержится в угловой координате Θ объекта, то измерение сводится к выработке оценки $\hat{\Theta}$ этого параметра. Другими словами: задача сводится к нахождению решающего правила определения наилучшей из всех возможных (оптимальной) оценки измеряемого параметра $\hat{\Theta}$. Для ее выявления необходим некоторый критерий оптимальности, который приведет к формированию (синтезу) алгоритма оптимального оценивания.

Считая измеряемый параметр Θ постоянным на интервале времени приема реализации $y(t)$, из общего критерия «минимума среднего риска» $r(\Theta) \rightarrow \min$ построим критерий «минимума условного среднего риска»:

$$r(\hat{\Theta}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

вычисляя значение такого риска из выражения

$$r(\hat{\Theta}) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\Theta, \hat{\Theta}) p_y(\Theta) d\Theta, \quad (3)$$

где $r(\Theta, \hat{\Theta})$ – функция стоимости; $p_y(\Theta)$ – апостериорная плотность вероятности угловой координаты Θ .

Функция стоимости характеризует плату за ошибочное решение. Эта функция может задаваться различными зависимостями. Так, например, для радиолокации она может быть представлена в виде δ -функции (рис. 1,а):

$$r(\Theta, \hat{\Theta}) = 1 - \delta(\Theta - \hat{\Theta}). \quad (4)$$

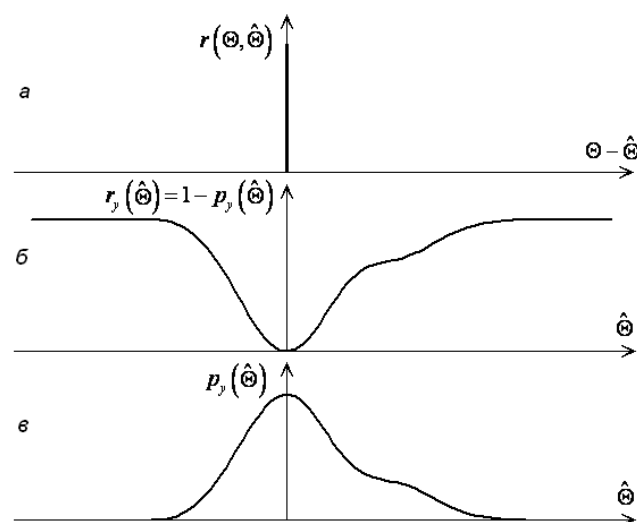


Рис. 1. Дельта-функция стоимости ошибочной оценки $\hat{\Theta}$ параметра Θ (а), минимизация условного среднего риска (б) и максимизация апостериорной плотности вероятности (в)

Для этой простой функции стоимости условный средний риск (3) с учетом фильтрующего свойства δ -функции принимает вид:

$$r_y(\hat{\Theta}) = 1 - p_y(\hat{\Theta}). \quad (5)$$

Условный средний риск имеет минимальную величину (стоимость) при достижении оптимального значения Θ , то есть при $\Theta = \Theta_{\text{опт}}$ (рис.1,б). При этом апостериорная плотность вероятности имеет максимум (рис. 1,в).

Таким образом, от критерия «минимума условного среднего риска» (2), согласно которому оптимальная оценка находится по правилу

$$\hat{\Theta}_{\text{опт}} = \arg \min r_y(\hat{\Theta}), \quad (6)$$

можно перейти к критерию «максимума апостериорной плотности вероятности»

$$p_y(\hat{\Theta}) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Тогда оптимальная оценка определяется из соотношения

Поляков Виктор Иванович, к.т.н., доцент, профессор кафедры «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Стрибук Александр Михайлович, директор ОАО «Цветотрон», г. Брест.

$$\hat{\Theta}_{\text{опт}} = \arg \max_{\Theta} p_y(\Theta). \quad (8)$$

Расчеты показывают ([3]), что апостериорная плотность вероятности определяется из выражения

$$p_y(\Theta) = k \cdot p(\Theta) \cdot p(y/\Theta), \quad (9)$$

где $p(\Theta)$ – апостериорная плотность вероятности распределения параметра Θ ; $p(y/\Theta)$ – функциональная зависимость от реализации $y(t)$ при фиксированных значениях параметра Θ , называемая функцией правдоподобия; k – нормирующий коэффициент.

На практике широко используется отношение правдоподобия – как отношение плотности вероятностей реализаций $y(t)$ при наличии в ней сигнала с параметром Θ , и этой же реализации при отсутствии в ней такого сигнала:

$$I_y(\Theta) = \frac{p(y/\Theta)}{p(y)}. \quad (10)$$

При фиксированной выборке y отношение (10) зависит от параметра Θ , поэтому можно связать апостериорную плотность вероятности с отношением правдоподобия

$$p_y(\Theta) = k \cdot p(\Theta) \cdot I_y(\Theta). \quad (11)$$

Поскольку появление объекта с различных направлений равновероятно, то естественно принять закон распределения $p(\Theta)$ равномерным. Тогда получим, что

$$p_y(\Theta) \equiv I_y(\Theta). \quad (12)$$

Из этого соотношения следует, что оптимальную оценку Θ можно находить, воспользовавшись критерием «максимума отношения правдоподобия»:

$$I_y(\Theta) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Оптимальная оценка при этом находится в соответствии с алгоритмом:

$$\hat{\Theta}_{\text{опт}} = \arg \max_{\Theta} I_y(\Theta). \quad (14)$$

Известно [3], что отношение правдоподобия является достаточной статистикой. Поэтому решение задачи измерения (оценки) параметра Θ сигнала сводится к вычислению отношения правдоподобия (либо другой достаточной статистики) и по нему – к определению оптимальной оценки этого (или любого другого) параметра сигнала.

На практике в качестве достаточной статистики используют не отношение правдоподобия, а монотонно связанную с ним функцию. Это значительно упрощает построение оптимальных как обнаружителей, так и измерителей, поскольку они в своем составе содержат общий элемент, вычисляющий достаточную статистику. Вычисленное значение достаточной статистики в обнаружителе сравнивается с порогом, а в измерителе – подается на устройство определения максимума достаточной статистики, соответствующего оптимальному значению измеряемого параметра сигнала.

В случае приема сигналов на фоне белого шума достаточной статистикой (для сигнала со случайными параметрами) является

нормированное модульное значение весового интеграла $|\dot{Z}(\Theta)|$.

Качество измерения параметров сигнала характеризуется дисперсией D_0 ошибки измерения (среднеквадратическим значением σ_{Θ} , при нулевом среднем $D_0 = \sigma_{\Theta}^2$). В свою очередь

$$\sigma_{\Theta} = \sqrt{\sigma_{\Theta}^2} = \frac{\Delta Q_{0,5p}}{q}, \quad (15)$$

где $\Delta Q_{0,5p}$ – ширина ДН по уровню половинной мощности;

$q = \sqrt{2\mathcal{E}/N_0}$ – отношение сигнал/шум; (\mathcal{E} – энергия сигнала,

N_0 – спектральная мощность шума).

Отметим, что приведенные соотношения характеризуют так называемые потенциальные возможности сигнала и не учитывают потери в аппаратуре РЭС.

Таким образом, устройства пеленгации (измерители угловой координаты) должны содержать в своем составе согласованный фильтр и устройство определения максимума нормированного модульного значения весового интеграла.

Структурная схема устройства выделения центрального импульса пачки во временной области. Схема устройства приведена на рисунке 2 [4].

Устройство содержит последовательно включенные первый блок 1 стробирования, сумматор 2, модулятор 3 и режекторный фильтр 4, при этом выход сумматора 2 – через последовательно включенные линию задержки 5 и второй блок 6 стробирования – соединен со вторым входом сумматора, а вторые входы блоков стробирования и модулятора соединены с соответствующими выходами генератора 7 стробов и весовых функций. Кроме того, в устройство последовательно включены: амплитудный детектор 8, первый узкополосный видеофильтр 9 и вентиль запрета 10, при этом выход амплитудного детектора 8 через последовательный дополнительный модулятор 11, второй узкополосный видеофильтр 12 и двухполупериодный выпрямитель 13 подключен ко второму входу вентиля запрета 10, второй вход дополнительного модулятора 11 соединен с выходом генератора 7 стробов и весовых функций, а вход амплитудного детектора 8 подключен к выходу режекторного фильтра 4.

Устройство работает следующим образом. Сигнал промежуточной частоты с помощью первого блока стробирования стробируется короткими импульсами, следующими с периодом, определяемым теоремой Котельникова. Выборки сигнала с выхода блока стробирования поступают на первый вход сумматора и задерживаются в результате циркуляции по цепи: сумматор, линия задержки и второй блок стробирования – на время, равное периоду следования импульсов РЭС плюс длительность стробирующего импульса. В результате циркуляций на выходе сумматора 2 обрезается сжатая во времени пачка выборок из всех периодов пачки отраженных от цепи импульсов. Сжатие во времени приводит к растяжению частотного спектра сигнала на выходе сумматора, что облегчает режекцию остатков пассивной помехи на выходе модулятора, который управляется напряжением с выхода генератора стробов и весовых функций. Взвешенная смесь сигнала и помехи с выхода модулятора проходит

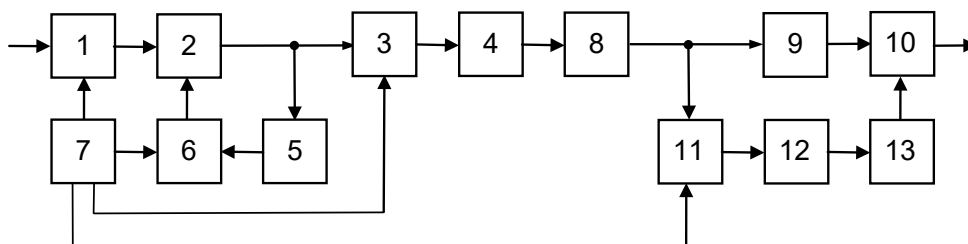


Рис. 2. Устройство выделения центрального импульса пачки во временной области

через режекторный фильтр, где происходит подавление пассивной помехи. Очищенный от помехи полезный сигнал выделяется путем использования некогерентного накопления с помощью детектора и узкополосного видеофильтра. Все указанные блоки входят в канал симметричной весовой обработки.

Одновременно сигнал с выхода амплитудного детектора поступает в канал асимметричной весовой обработки, содержащий модулятор 11, узкополосный видеофильтр 12 и двухполупериодный выпрямитель 13. Напряжение с выхода модулятора 11, управляемого напряжением генератора 7 стробов и весовых функций, после интегрирования в узкополосном видеофильтре 12 и выпрямления в двухполупериодном выпрямителе 13 поступает на вход вентиля запрета 10. Это напряжение отличается от нуля до тех пор, пока центр пачки импульсов не совместится с нулевой точкой асимметричной функции.

На второй вход вентиля запрета поступает напряжение канала симметричной весовой обработки. Максимуму напряжения на выходе этого канала соответствует напряжение, близкое к нулю на выходе канала асимметричной весовой обработки. В этот момент вентиль пропускает импульс. Этот импульс имеет максимальное отношение сигнал/помеха и соответствует направлению на наблюдаемый объект.

Сравнительные испытания данного устройства с устройствами, описанными в [1, 2], показали, что вследствие большего отношения сигнал/помеха точность измерения угловой координаты повышается. Наряду с этим возрастает и разрешающая способность по угловой координате, так как каждому объекту на выходе устройства соответствует не пачка импульсов, а один импульс отсчета, используемый как для обнаружения объекта, так и для измерения его координат.

Структурная схема устройства выделения центрального импульса пачки в частотной области. Схема приведена на рисунке 3 [5].

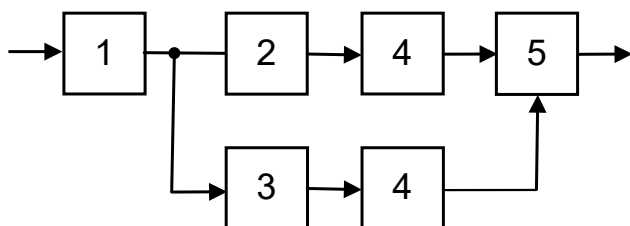


Рис. 3. Устройство выделения центрального импульса пачки в частотной области

Устройство выделения импульса, соответствующего угловой координате объекта, включает рециркулятор 1 со сдвигом частоты. Выход рециркулятора подключен к фильтрам 2 и 3, соответственно, с симметричной и антисимметричной частотными характеристиками. Выходы фильтров через амплитудные детекторы 4 подключены к вентилю 5 запрета, который пропускает на выход лишь импульс, соответствующий центру пачки.

Весовая обработка пачечного сигнала осуществляется за счет выбора амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтров. В процессе работы рециркулятора 1 импульсы пачки непрерывно, через период, смещаются по частоте. Максимальное значения отношение сигнал/шум будет достигать в момент совмещения огибающей пачки импульсов с АЧХ фильтра 2. В этот момент и целесообразно измерять угловую координату объекта. Выработка импульса отсчета центра пачки (угловой координаты объекта) осуществляется с помощью фильтра 3. Его АЧХ соответствует производной АЧХ фильтра 2.

На рис. 4 пунктиром показана АЧХ фильтра 3, а символами «+» и «-» отмечен знак его фазо-частотной характеристики; сплошной же линией изображена АЧХ фильтра 2.

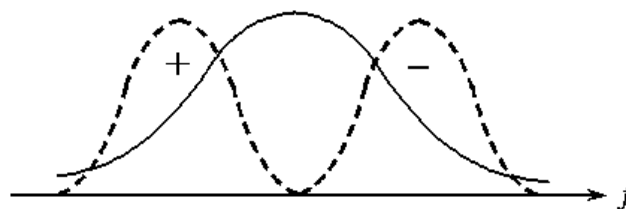


Рис. 4. Частотные характеристики симметричного и антисимметричного фильтров

До тех пор, пока центр пачки не совмещен с провалом антисимметричной АЧХ, на выходе фильтра 3 формируются импульсы, запирающие вентиль 5 запрета. При совмещении огибающей пачки с симметричной АЧХ фильтра 2 центр пачки совмещается с провалом антисимметричной АЧХ фильтра 3. В момент, когда на выходе фильтра 2 напряжение достигает максимума, а на выходе фильтра 3 оно равно нулю, вентиль запрета открывается. Полученный на выходе вентиля импульс может быть использован либо для визуальной индикации (при этом исключается ошибка оператора по определению центра дужки), либо для автоматического считывания углового положения антенны (при этом отпадает необходимость в отсчетах начала и конца пачки [1, 3]). Одновременно этот же импульс служит для отсчета дальности и сравнения с порогом при обнаружении объекта. Реальная разрешающая способность по угловой координате при использовании данного устройства повышается за счет того, что выделение импульса, соответствующего центру пачки, осуществляется в линейном тракте с большим динамическим диапазоном. На индикатор с выхода устройства поступают одиночные импульсы, поэтому ни ограниченный диапазон индикатора, ни схема автоматического съема угловой координаты не влияют на разрешающую способность по угловой координате.

Заключение. Анализ оптимального измерения угловой координаты объекта показал, что потенциальная точность измерения угла определяется отношением сигнал/помеха и разрешающей способностью по угловой координате (15). Поэтому в случае использования импульсного сигнала повышение точности измерения и разрешения по углу возможно при оптимальной обработке пачечного сигнала и выделении центрального импульса пачки, как для решения задачи обнаружения, так и для измерения координат объекта. Приведены структурные схемы устройств выделения центрального импульса пачки во временной и в частотной области. Предложенный алгоритм является основой для альтернативной реализации подобных оптимальных измерителей средствами цифровой обработки сигналов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
2. А. с. 348107 СССР, МКИ2 G 01 S 7/30. – 02.11.70. – не публ.
3. Радиозлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
4. Устройство выделения центрального импульса пачки: а. с. 568919 СССР, МКИ2 (МПК5) G 01 S 3/20 / В.И. Поляков, В.В. Фединин. – № 2069353; заявл. 18.10.74; опубл. 15.08.77 // Открытия. Изобрет. – 1974. – № 30.
5. Устройство выделения импульса, соответствующего угловой координате цели: а. с. 392767 СССР, МКИ G 01 S 3/02 / В.И. Поляков, В.В. Фединин. – № 1714919; заявл. 17.11.71. – не публ.
6. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Материал поступил в редакцию 01.11.10

POLYAKOV V.I., DERECHENNIK S.S., STRIBUK A.M. On ability to improve angular resolutions and accuracy of angular measurements

Probability-theoretical analysis of radio vectoring measurement quality is carried out for angular coordinates of objects with use of composed optimality criterion. An algorithm was proposed for measurements with improved characteristics of accuracy and resolution at angular coordinate. The algorithm is the basis for alternative realization of optimal measurers which are using central pulse selection from a packet of received radio pulses.