НАВІГАЦІЯ

УДК 621.391

Е.С. Козелкова д.т.н., с.н.с., Т.В. Уварова

Национальный университет обороны Украины, Киев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТЕНН С ПЛОСКОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассматриваются вопросы определения оптимальной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов с использованием систем антенн с плоской апертурой.

Ключевые слова: *антенны с плоской апертурой, диаграмма направленности, разрешающая способность, пространственная обработка сигналов.*

Введение

Применение оптимальных алгоритмов обработки сигналов в измерительных радиосистемах способствует уменьшению энергетических потерь сигнала и, как следствие, улучшению качественных характеристик системы в целом. Несмотря на ДОСтаточно полно разработанную в настоящее время теорию пространственно-временной обработки сигналов, нашедшую отражение в работах [1 - 3], отсутствуют конкретные результаты по синтезу системы пространственно-временной обработки сигналов при совместной оценке угловых параметров – угловых координат, угловых скоростей и ускорений. Данные вопросы требуют так же уточнения и развития, синтез систем обработки пространственно-временных сигналов с антеннами с плоской апертурой. Отмеченные в ряде работ [1-3] особенности пространственно-временной обработки сигналов от протяженных целей не доведены до конкретных результатов, не оценены качественные характеристики таких систем обработки, не определены выигрыши, даваемые применением оптимальных алгоритмов обработки сигналов. Применение неоптимальных алгоритмов обработки всегда связано с энергетическими потерями и, как следствие, с ухудшением качественных характеристик системы обработки [3].

Если рассматривать систему, которая рассчитана на оптимальное измерение угловых координат $\bar{}$, то параметр $\dot{\bar{}}$ – угловая скорость – рассматривается, как мешающий параметр при измерении $\bar{}$. Как показывают расчеты, если величина $\dot{\bar{}}$ не превышает некоторого значения $\dot{\bar{}} < 1/2TX_M$, то при построении системы обработки сигнала можно принять $\dot{\bar{}} = 0$. В противном случае в оптимальной системе оценки параметра $\bar{}$ необходимо предусмотреть измерение или усреднение по $\dot{\bar{}}$. В то же время при отработке и применении высокодинамических, маневренных объектов осуществляется измерение параметров $\bar{}$, $\dot{\bar{}}$ [2], а параметр $\ddot{\bar{}}$ – угловое ускорение – является мешающим, что также требует определения допустимых границ применения оптимальных алгоритмов обработки.

Учитывая вышеизложенное в статье рассматриваются вопросы, связанные с обработкой сигналов точечных целей антеннами с плоской апертурой. Определяются преимущества, получаемые при использовании оптимальных алгоритмов, исследуются особенности обработки сигналов при совместной оценке угловых координат, угловых скоростей и ускорений, а также разрешение сигналов по совокупности измеряемых параметров.

Постановка задачи

Условия задачи сформулируем следующим образом. Заданы интервалы пространства $\vec{r} \in Z$ и времени $t \in [-T, T]$, отводимые под антенную систему и временную обработку. Под антенную систему отведем часть плоскости *xoy*, ограниченную окружностью радиуса *R*. Принимаемое колебание $\dot{o}(t, \vec{r})$ будем представлять в виде суммы [3]

$$\dot{o}(t, \vec{r}) = S(t, \vec{r}, \ , v) + n(t, \vec{r}), \quad (1)$$

аддитивного поля помехи $n(t, \vec{r})$, представляющего собой нормальный случайный процесс с корреляционной функцией [2]

$$R(t, x, y) = \frac{N_0 ª^2}{2®} ¢(t, x, y), \quad (2)$$

и поля полезного сигнала $S(t, \vec{r}, \ , v)$, имеющего характер детерминированной функции времени *t*, пространственных координат $\vec{r}$, и совокупности случайных параметров $\vec{a} = (\ ,v)$.

Требуется определить условия формирования оптимальной обработки пространственно-временных сигналов антеннами измерительной системы.

Изложение основного материала

Выходной эффект оптимальной системы обработки $q(\vec{a}) = q(\ ,v)$ определяется согласно условия [3]

$$\left|\vec{a}_i - \vec{a}_j\right| > \Delta\vec{a} \ , \tag{3}$$

где $\Delta\vec{a}$ – соответственно задаваемые тактико-техническими требованиями постоянные разрешения по соответствующим параметрам.

Определяя опорный сигнал системы обработки подстановкой (2) в выражение

$$\vec{p} - \vec{p}_0 = r\cos(\ -¥)\cos a \tag{4}$$

получаем

$$^{-}(t_1, t_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) = {}^{-}(t_1 - t_2, \vec{r}_1 - \vec{r}_2) =$$

$$= \frac{2®}{N_0 a^2} ¢\,(t_1 - t_2, x_1 - x_2, y_1 - y_2) \tag{5}$$

$$q(\vec{a}) = k\exp\left\{\frac{2®}{N_0 a^2}\int_{-T}^{T}\int_{Z} y(t,\vec{r})s(t,\vec{r},\ ,v)dtd\vec{r}\right\}. \tag{6}$$

Полагая, что поле в раскрыве антенны $S(t,\vec{r},\vec{a})$ создается точечным неподвижным источником излучения монохроматических колебаний, находящихся в дальней зоне

$$S = S_0\exp\left\{i\mu_0 t - \frac{\vec{r}\vec{p}}{c}\right\} =$$

$$= S_0\exp\left\{i\mu_0\left(t - \frac{r}{c}\cos v\cos(a-\ )\right)\right\}, \tag{7}$$

приходим к следующей записи выходного эффекта (6)

$$q(\vec{a}) = \int_{-N}^{T} s_0\exp\{j\mu_0 t\}dt\int_{Z} y(t,\vec{r})\exp\left\{-j2®\frac{\vec{p}\vec{r}}{a}\right\}d\vec{r}. \tag{8}$$

Внутренний интеграл в (8)

$$q(\vec{a},t) = \int_{Z} y(t,\vec{r})\exp\left\{-j2®\frac{\vec{p}\vec{r}}{a}\right\}d\vec{r}, \tag{9}$$

определяет оптимальную пространственную обработку (оптимальный прием антенной), а наружный – оптимальную временную обработку.

$$q(\vec{a}) = \int_{-N}^{T} q(a,t)s_0\exp\{j\mu_0 t\}d\vec{r}. \tag{10}$$

Оптимальная пространственная обработка сводится, как следует из (9), к “фокусировке” антенны на направление прихода сигнала $(\ ,v)$.

Такая оптимальная обработка (9) может быть осуществлена вращающейся плоской круговой антенной с постоянным амплитудно-фазовым распределением на раскрыве с диаграммой направленности

$$f(\vec{a}) = \frac{1}{A}\int_{Z}\exp\left\{-j2®\frac{\vec{p}\vec{r}}{a}\right\}d\vec{r}. \tag{11}$$

Пусть на направлении $(\ _0, v_0)$ имеется источник излучения, формирующий в раскрыве антенны поле

$$y(t,\vec{r}) = s_0\exp\left\{-j2®\frac{\vec{p}\vec{r}}{a}\right\} + n(t,\vec{r}). \tag{12}$$

В выражении (12) временной множитель учитывается постоянно, поэтому он опущен. Тогда выходной эффект оптимальной антенны будет

$$q_{A10110}(\ ,v) =$$

$$= \int_0^R\int_0^{2®} s_0\exp\left\{-j\frac{2®}{a}r[\cos v_0\cos(a-\ _0) - \cos v\cos(a-\ )]\right\}drda +$$

$$+ \int_{y} n(t,r)\exp\left\{j\frac{2®}{a}\vec{p}\vec{r}\right\}d\vec{r}. \tag{13}$$

Запишем выходной эффект Y_{A10} вращающейся антенны. Для этого определим поле сигнала на апертуре $\vec{r}$ при повороте ее на угол $(\hat{\ },\hat{v})$

$$S(t,r',\ ,v) =$$

$$S_0\exp\left\{-j\frac{2®}{a}r'\cos(\hat{v}' - v_0)\cos\left(a - \ _0 - \hat{\ }'\right)\right\}. \tag{14}$$

Тогда

$$Y_{A10} = \int_0^R\int_0^{2®} S_0\exp\left\{-j\frac{2®}{a}r'\cos(v_0 - v_0)\cos\left(a - \ _0 - \hat{\ }\right)\right\}dr'da +$$

$$+ \int_{Z} n(t,r')dr' \ , \tag{15}$$

где r' в (14) и (15) учитывает изменение апертуры антенны при ее повороте.

Статистические характеристики нормальных случайных процессов, определяемых вторыми слагаемыми в выражениях (14) и (15) совпадают.

Практически совпадают и сигнальные составляющие выходных эффектов. Это означает, что вращающаяся (сканирующая) антенна с заданной диаграммой направленности обеспечивает оптимальную пространственную обработку сигналов, если не учитывать времени на обзор пространства.

Для определения потенциальных погрешностей измерения параметров $(\ ,v)$ найдем пространственно-временную корреляционную функцию сигнала по угловым координатам. По определению

$$\cdot\,(\hat{\ },\hat{v}) = C\int_{Z}\int_{Z} S(t,\vec{r},\ ,v)S^*(t,\vec{r},\ +\hat{\ },v+\hat{v})dtd\vec{r}. \tag{16}$$

Здесь

$$S(t,\vec{r}, \quad ,v) = S_0 \exp\left\{ j2®f_0\left(t - \frac{\vec{p}\vec{r}}{c} \right) \right\}. \qquad (17)$$

Подставив выражение (17) в (16) получим:

$$\cdot\left(\hat{\ },\hat{v}\right) = C\int_{-T}^{T}\int_{0}^{R}\int_{0}^{2®} S_0^2 \exp\left\{ -j2®f_0\left[t - \frac{r}{c}\cos v \cos(a - \quad) \right] \right\} \times$$

$$\times \exp\left\{ j2®f_0\left[t - \frac{r}{c}\cos(v-\hat{v})\cos(a - \quad - \hat{\ }) \right] \right\} rdrdtda =$$

$$\cdot\left(\hat{\ },\hat{v}\right) = \qquad .(18)$$

$$S_0^2\int_0^R\int_0^{2®} \exp\left\{ j2® \frac{r}{a}\left[\cos v \cos(a - \quad) - \cos(v-\hat{v})\cos\left(a - \quad - \hat{\ }\right) \right] \right\} rdrda$$

Вводя обозначения

$$\dot{A} = \cos v \cos \quad - \cos\left(v + \hat{v}\right)\cos\left(\quad + \hat{\ }\right);$$

$$B = \cos v \sin \quad - \cos\left(v + \hat{v}\right)\sin\left(\quad + \hat{\ }\right); \qquad (19)$$

$$D^2 = A^2 + B^2 = \cos^2 v + \cos^2\left(v + \hat{v}\right) -$$

$$- 2\cos v \cos\left(v + \hat{v}\right)\cos \hat{\ };$$

$$¥ = arctg\,\frac{B}{A},$$

приходим к следующей записи (18)

$$\cdot\left(\hat{\ },\hat{v}\right) = S_0^2\, 2T\int_0^R\int_0^{2®} \exp\left\{ j2® \frac{r}{a} D\cos(a - ¥) \right\} rdrda =$$

$$= S_0^2\, 2T\, 2®\int_0^R rI_0\left(2® \frac{r}{a} D \right) dr = 2Q\frac{I_1\left(2® \frac{R}{a} D \right)}{2® \frac{R}{a} D}. \qquad (20)$$

Здесь $Q = S_0^2\, 2T®R^2$ – энергия сигнала;

$I_0(x), I_1(x)$ – функции Бесселя, соответственно нулевого и первого порядка.

Воспользовавшись разложением функции Бесселя $I_1(x)$ [18], получаем

$$\cdot\left(\hat{\ },\hat{v}\right) = 2Q\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{16}\left(2® \frac{R}{a} D \right)^2 \right]. \qquad (21)$$

Для расчета теоретически предельной точности оценок необходимо определить информационную матрицу *Ф*. Дисперсии оценок будут найдены как соответствующие диагональные элементы матрицы ∑, обратной *Ф*: ∑=*Ф*$^{-1}$.Воспользовавшись выражением для произвольного элемента матрицы $Ф_{ij}$ и выражением (5) для опорного сигнала системы обработки, получаем

$$\sum\nolimits_{\hat{\ }\hat{v}} = \sum\nolimits_{\hat{v}\hat{\ }} = \left\langle \left(\quad - \ ^*\right)\left(v - v^*\right) \right\rangle = 0,$$

$$±^2_{\hat{\ }} = \sum\nolimits_{\hat{\ }\hat{\ }} = \left\langle \left(\quad - \ ^*\right)^2 \right\rangle = \frac{N_0}{Q\left(2® \frac{R}{a} \right)^2 \cos^2 v}, \qquad (22)$$

$$±^2_{\hat{v}} = \sum\nolimits_{\hat{v}\hat{v}} = \left\langle \left(v - v^*\right)^2 \right\rangle = \frac{N_0}{Q\left(2® \frac{R}{a} \right)^2 \sin^2 v}.$$

Как следует из приведенных соотношений оценки угловых координат β и v являются независимыми. Результирующая точность зависит от энергетического отношения сигнал-помеха и тем выше, чем больше размеры используемой апертуры, определяемые отношением *R*/*λ*.

Выводы

Исходя из определения потенциальных погрешностей измерительной радиосистемы, и анализа пространственно-временной корреляционной функции сигнала по угловым координатам следует, что вращающаяся (сканирующая) антенна с заданной диаграммой направленности может обеспечить оптимальную пространственную обработку сигналов, если не учитывать времени на обзор пространства.

Результирующая точность зависит от энергетического отношения сигнал-помеха и тем выше, чем больше размеры используемой апертуры.

Список литературы

1. *Родимов А.П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи / А.П. Родимов, В.В. Поповский // М.: Радио и связь, 1984. – 272с.*
2. *Оптическая обработка информации / Под ред. Д. Кейсесента. Пер. с англ. // М.: Мир, 1980. – 352с.*
3. *Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Справочник. Под ред. Я. Д. Ширмана // М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.*
4. *Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы / А.Ф. Котов, Л.Н. Марков // М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.*
5. *Пространственно-временная обработка сигналов / Под ред. И.Я. Кремера // М.: Радио и связь, 1984. – 224с.*
6. *Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем / А.А. Коростелев // М.: Радио и связь, 1987. – 320с.*

Надійшла до редколегії 24.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский унмверситет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТЕНН С ПЛОСКОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

К.С. Козелкова, Т.В. Уварова

У статті розглянуті питання визначення оптимальної просторово-часової обробки приймальних сигналів з використанням систем антен з плоскою апертурою.

Ключеві слова: *антени з плоскою апертурою, діаграма спрямованості, розрізнена здатність, просторова обробка сигналів.*

THE USE OF ANTENNAS WITH PLANAR APERTURE FOR OPTIMAL PROCESSING SPACE-TIME SIGNALS

E.S. Kozelkova, T.V. Uvarova

The article deals with the determination of the optimal space-time processing of the received signals using antenna systems with a flat aperture.

Keywords: *antenna with a flat aperture directivity pattern, resolution, spatial signal processing.*