

УДК 621. 396. 96

СИНФАЗНОЕ СУММИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ГАРМОНИК В МНОГОЧАСТОТНОЙ И МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНОЙ (РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ) СИСТЕМЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С РАЗРЕШЕНИЕМ ПОРЯДКА ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Н.И. Матюхин*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, 61077, пл. Свободы, 4.
Поступила в редакцию 24 марта 2011 г*

Рассматривается известный метод синфазного суммирования гармонических колебаний с различными временными и пространственными частотами. В обычной антенне гармоники с различными пространственными частотами в направлении на объект складываются в фазе и формируется таким образом диаграмма направленности (главный и боковые лепестки). В других направлениях пространственные гармоники, складываясь с различными фазами, формируют боковые лепестки диаграммы направленности. Если создать многочастотную и многопозиционную когерентную систему такую, что на отдельных антенных позициях принимаются сигналы с различными несущими частотами, то на выходе общей антенны их можно сложить в фазе в определенный момент времени аналогично тому, как это происходит в с пространственными частотами в обычной антенне. В этом случае обеспечивается трехмерное пространственное разрешение порядка длины волны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиоголографическое изображение, радиоголограмма, объемное изображение объекта, трехмерное разрешение..

Розглядається відомий метод синфазного підсумовування гармонічних коливань з різними часовими і просторовими частотами. У звичайній антені гармоніки з різними просторовими частотами в напрямі на об'єкт складаються у фазі і формується таким чином діаграма спрямованості (головний і бічні пелюстки). У інших напрямках просторові гармоніки, складаючись з різними фазами, формують бічні пелюстки діаграми спрямованості. Якщо створити багаточастотну і багатопозиційну когерентну систему таку, що на окремих антенних позиціях приймаються сигнали з різними несучими частотами, то на виході загальної антени їх можна скласти у фазі в певний момент часу аналогічно тому, як це відбувається з просторовими частотами в звичайній антені. В цьому випадку забезпечується тривимірне просторове розрізнення порядку довжини хвилі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіоголографічне зображення, радіоголограма, об'ємне зображення об'єкту, тривимірне просторове розрізнення.

The known method of the in-phase adding up of harmonic vibrations with different temporal and spatial frequencies is examined. In ordinary aerial of accordion with different spatial frequencies in sending to the object folded in a phase and the diagram of orientation is formed thus (main and lateral petals). In other directions spatial accordions folded with different phases and fomiruyut lateral petals of diagram of orientation. If to create the multifrequency and multiposition coherent system such, that on separate aerial positions signals are accepted with different bearings frequencies, on the output of general aerial they can be laid down in a phase in certain moment of time like that as it takes a place with spatial frequencies in ordinary aerial. In this case spatial resolution of order of wave-length is provided thus.

KEYWORDS: radioholographic image, radiohologram, three-dimensional image of object, spatial resolution.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для получения радиоголографического изображения объекта по совокупности отраженных сигналов от его элементов («блестящих» точек) необходимо, чтобы разрешение по трем пространственным координатам составляло доли его размеров ($\delta\ell = (0.1-0.3)\ell_{об}$, $\ell_{об}$ - линейные размеры объекта, $\ell = \{\xi, \eta, R\}$ - линейные пространственные координаты по угловым направлениям и дальности). Такое разрешение по двум пространственным координатам в картинной плоскости в оптическом диапазоне и в диапазоне радиоволн получено. Ему соответствует апертура порядка $L = 10^7 \lambda$, где λ - длина волны. Можно показать, что принципиальных ограничений в получении такого разрешения не существует. В США, например, реализован радиотелескоп с антенной в виде трехлучевой звезды с размерами плеча 36 км [1]. В оптическом диапазоне реализованы апертуры с размером 1-6 м. Автор длительное время проводил исследования [2] по возможности построения многопозиционной пространственно-когерентной радиолокационной (радиоголографической) системы. Предложена «большая» радиоголографическая информационная система, которая может выполнять все известные и новые радиолокационные операции и обеспечивать линейное пространственное разрешение порядка

длины волны на дальности порядка радиуса Земли. В ХНУ имени В.Н. Каразина на кафедре прикладной электродинамики в лаборатории радио – и оптической голографии под руководством Г.С. Сафронова [3] была создана радиоголографическая установка (РГУ-3), обеспечивающая на малой дальности (до 1 км) разрешение по трем координатам порядка 0,5 м. При этом разрешение по дальности обеспечивалось путем формирования последовательности гладких сигналов с различными несущими частотами и с последующим их синфазным сложением. В этом случае разрешение по дальности не связано с голографической обработкой для получения разрешения по угловым координатам (разделение переменных). Метод синфазного сложения нескольких гармонических колебаний (синусоид) с различными частотами в физике известен давно [4]. После этого в радиолокации стали применяться ЛЧМ сигналы [5]. Во всякой антенне при формировании диаграммы направленности синфазно складываются пространственные гармоники, которые соответствуют антенным элементам (антенным позициям). Пространственная частота тем выше, чем дальше удален от центра антенны элемент антенны (позиция). В статье рассматривается этот метод по новому назначению. Отличие состоит в том, что операция синфазного сложения временных гармоник не отделяется от операции по общей голографической обработке поля (переменные не разделяются). Платой за разрешение по дальности, как и прежде, является необходимость создания набора сигналов с различными несущими. Объект облучается несколькими сигналами с различными несущими частотами, а принимаются сигналы на отдельных позициях только на одной частоте. Это имеет место, например, в многопозиционной когерентной системе, объединяющей существующие локаторы, работающие на различных частотах. Вторым примером может служить многочастотная и многопозиционная когерентная система, в которой каждая антенная позиция является приемо-передающей. На каждой антенной позиции (антенном модуле) излучаются и принимаются гладкие сигналы на одной собственной частоте, но все автономные генераторы и приемники когерентно объединены. Тогда по двум пространственным координатам в картинной плоскости осуществляется обычная голографическая обработка, а по третьей пространственной координате (времени запаздывания) осуществляется синфазное сложение гладких сигналов с различными несущими частотами, которые прошли путь от генератора, к наблюдаемому объекту, от него через турбулентную атмосферу, через среду распространения радиоволн и голографический локатор и получили соответствующие фазовые набеги. Если облучение объекта осуществляется одновременно несколькими сигналами с различными частотами, то на выходе голографического локатора в фокальной плоскости и в направлении на объект все пространственные и временные гармоники будут складываться в фазе.

Целью статьи является: рассмотрение возможности совместного применения известных методов синфазного сложения гармонических колебаний с различными временными и пространственными частотами в многочастотной и многопозиционной пространственно-когерентной (радиоголографической) системе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Обеспечение двумерного пространственного разрешения порядка длины волны в многопозиционной пространственно-когерентной системе. Для описания методов обработки волнового поля в радиоголографической системе и управления её системными параметрами важное значение имеет понятие пространственной и временной частоты. Они определяют разрешение по пространственным координатам и дальности. В обычной радиоголографической системе разрешение по двум пространственным координатам ($\ell = \{\xi, \eta\}$) определяется выражением $\delta\ell = \lambda R/L$, где λ, R, L - длина волны, дальность до наблюдаемого объекта, размер апертуры. Разрешение по дальности определяется выражением $\delta R = \delta\ell \cdot 2R/L$. При $2R/L = 1$ оно равно разрешению по пространственным координатам $\delta R = \delta\ell$, а на рабочих дальностях $R > L/2$ оно может изменяться на порядок. На рис. 1

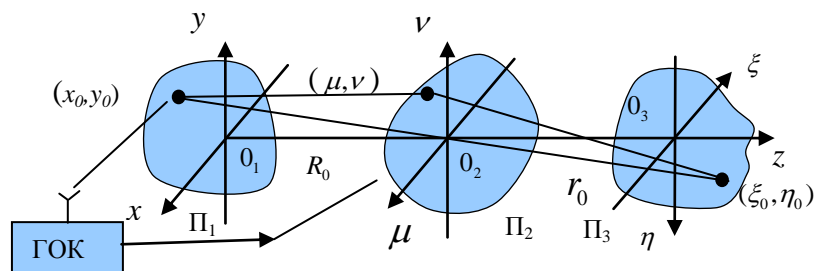


Рис. 1. Фазовые набеги при прохождении сигнала в радиоголографическом локаторе.

приведена схема определения фазовых набегов сигнала при прохождении от генератора опорных колебаний к наблюдаемому объекту (x_0, y_0) , от него через турбулентную атмосферу к элементу антенны (μ, ν) и затем к точке (ξ_0, η_0) на плоскости восстановленного изображения по зарегистрированной голограмме. На двух выходах генератора опорных колебаний комплексный сигнал имеет вид временного гармонического колебания. В каждой точке плоскости изображения сигнал имеет такую же временную гармоническую составляющую как и на выходе генератора. Однако, по мере прохождения сигнала через радиолокационный локатор дополнительно изменяется фаза сигнала и создаются пространственные гармонические колебания на разных пространственных частотах, зависящих от местоположения антенного элемента. Сложение пространственных гармонических колебаний в плоскости отображения образует диаграмму направленности, как это происходит во всякой антенне («сжатие» гармоник по пространству). Напряженность поля в каждой точке плоскости изображения имеет вид

$$U(\xi, \eta, t) = A e^{j2\pi f t + j\varphi_\Sigma}, \quad \text{где } \varphi_\Sigma = \varphi_{ГОК} + \varphi_{Г, x_0, y_0} + \varphi_{опр}, \quad \varphi_{атм}, \varphi_{x_0, y_0, \mu, \nu}, \varphi_{опор}, \varphi_{\mu, \nu, \xi, \eta} - \text{соответственно,}$$

начальная фаза генератора; набегающая фаза на пути от генератора к точке расположения объекта; добавочная фаза при прохождении через атмосферу; набегающая фаза на пути от объекта к элементу антенны; фаза опорного колебания; набегающая фаза на пути от элемента антенны к точке на плоскости изображения.

Предположим, что антенные позиции с общим числом N располагаются по кругу с радиусом, равным половине размера апертуры. Тогда координаты антенных позиций определяются выражением $(\mu_n, \nu_n) = (L/2)(\cos(2\pi/N)n, \sin(2\pi/N)n)$, $n=1, \dots, N$. Модуль напряженности поля в плоскости изображения при фиксированной разности $\Delta R = R_0 - r_0$ между плоскостями (Π_1, Π_2) и (Π_2, Π_3) определяется выражением:

$$|U(\xi, \eta, \Delta R)| = A \left| \sum_{n=1}^N e^{j \frac{2\pi}{\lambda_\kappa} \left[\Delta R + ct + \frac{\mu_n^2}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 - \Delta R} \right) + \mu_n \left(\frac{\xi}{R_0 - \Delta R} - \frac{x_0}{R_0} \right) + \nu_n \left(\frac{\eta}{R_0 - \Delta R} - \frac{y_0}{R_0} \right) + \frac{\nu_n^2}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 - \Delta R} \right) + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2R_0} - \frac{\xi^2 + \eta^2}{2(R_0 - \Delta R)} \right]} \right|,$$

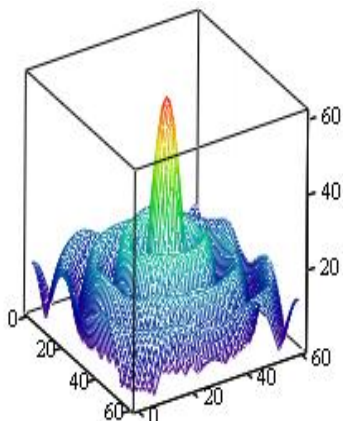
где t – текущее время, отсчитываемое от момента излучения зондирующего сигнала; c – скорость света; λ_0 – длина волны; $\lambda_\kappa = \lambda_0 + \kappa \cdot \Delta\lambda$; $\kappa = 1, \dots, N$; $\Delta\lambda = const$.

Двумерная диаграмма направленности антенны $|U(\xi, \eta)|$ показана на рис. 2. Зависимость напряженности поля от пространственной координаты и ошибки целеуказания по дальности $|U(\xi, \Delta R)|$ показана на рис. 3. По существу рассматривается трехмерная функция неопределенности $U(\xi, \eta, \Delta R)$. Как следует из графика, по координате дальности имеется неоднозначность.

Обеспечение трехмерного пространственного разрешения порядка длины волны путем создания многочастотной и многопозиционной когерентной системы. Если создать многочастотную и многопозиционную пространственно-когерентную систему такую, что излучается одновременно или по-следовательно набор сигналов на разных частотах, а принимаются на каждой антенной позиции сигналы только на одной частоте, то в каждой точке плоскости изображения получим набор временных гармоник на разных частотах. После их сложения образуется короткий сигнал, соизмеримый по длительности с периодом несущей частоты аналогично тому, как это происходит при сложении различных гармоник ЛЧМ сигнала («сжатие» сигнала по времени). В частном случае, когда ограничиваются «сжатием» сигнала только по пространственным координатам, исключают из состава выходного сигнала несущую и применяют процедуру опорных колебаний. В этом случае на апертуре антенны получается интерференционное волновое поле – изменение амплитуды и фазы сигнала, которое называется радиоголограммой. В плоскости восстановленного изображения $(\xi, 0, \eta)$ присутствуют только пространственные гармоники.

Если в качестве зондирующих сигналов использовать набор отрезков синусоид («гладкие» сигналы) на разных частотах и принимать их на соответствующих антенных позициях, а затем их складывать в фазе в плоскости изображения, то можно получить пространственное разрешение по дальности порядка длины волны. В направлении на объект $(\xi = x_0, \eta = y_0)$ и в начальный момент времени $(t=0)$ все сигналы с различными несущими, принятые на различных позициях, находятся в фазе относительно пространственных координат и времени. Потребуем, чтобы эти фазовые соотношения сохранились в момент времени, равном половине длительности гладкого сигнала $t = \tau_u / 2$. Для этого в каждую гармонику необходимо ввести фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi f_n \tau_u / 2$. Тогда каждую временную гармонику можно представить в виде $A_n \cos(2\pi f_n (t - \tau_u / 2))$. В момент времени $\tau_u / 2$ гармоники будут складываться

в фазе. В другие моменты времени фазы сигналов будут различными. Чем больше сигналов, тем меньше уровень боковых лепестков. Число позиций в голографическом локаторе составляет порядка $N=10-30$. Этого достаточно для того, чтобы уровень боковых лепестков в другие моменты времени был приемлемый (0,3-0,4) для разрешения объектов по дальности. По существу рассматривается четырехмерная функция неопределенности $U(\xi, \eta, \Delta R, t)$, в которой переменные не разделяются. График функции $U(\xi, t)$ приведен на рис. 4.



А Рис. 2. Диаграмма направленности общей антенны радиоголографического локатора $U(\xi, \eta)$

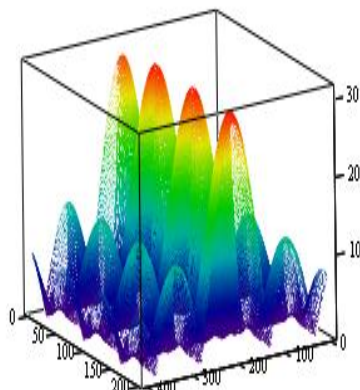


Рис. 3. Функция неопределенности измерения пространственной координаты и дальности $U(\xi, \Delta R)$.

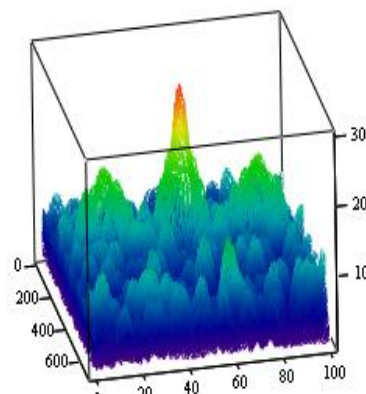


Рис.4. Функция неопределенности измерения пространственной координаты и времени прихода отраженного сигнала $U(\xi, t)$

ВЫВОДЫ

1. В обычной радиоголографической системе в картинной плоскости обеспечивается линейное пространственное разрешение порядка длины волны. По третьей пространственной координате – дальности – разрешение остается таким же, но только на дальности, равной половине размеров апертуры. В рабочем диапазоне изменения дальностей разрешение может изменяться на порядок.

2. В многочастотной и многопозиционной пространственно-когерентной системе можно применить метод синфазного сложения гармонических колебаний с различными временными и пространственными частотами. В этом случае можно обеспечить разрешение по дальности порядка длины волны на всех дальностях, а в картинной плоскости – как в обычном голографическом локаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Напьер П.Д. Большая антенная решетка: конструкция и характеристики современного радиотелескопа апертурного синтеза / П.Д. Напьер, А.П. Томсон, Р.Д. Эжерс // ТИИЭР. - 1983.- том 71, №11.
2. Матюхин Н.И. Системная теория динамических радиоголографических информационных систем наблюдения потока объектов в ситуациях конфликта / Н.И. Матюхин. – Харьков: - ХНУ имени В.Н. Каразина, 2007. – 417 с.
3. Сафронов Г.С. Введение в радиоголографию / Г.С. Сафронов, А.П. Сафронова. - М.: Сов. радио, 1973. - 287 с.
4. Сивухин Д.Д. Общий курс Физики. Оптика. – М: Наука, 1985.
5. Cook С.Е. Modification of Pulse Compression Waveform. – Pros. Natl/ Electron. Conf., v. 14, 1958.