

УДК: 621.396.67

ПЛОСКИЕ РЕШЕТКИ СЕНСОРОВ С ОПОРНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Башкатов И. П., к.т.н., доцент, Email: ibashkatov@gmail.com
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрены варианты использования плоских решеток сенсоров при решении задач мониторинга источников излучения волн. Корректная обработка выходных данных решеток требует использования синхронных многоканальных приемников излучения и устройств регулируемой задержки сигналов в каждом канале. Сложность физической реализации систем с такими компонентами возрастает с увеличением количества сенсоров решеток и для больших апертур становится неприемлемой. В таких случаях, для многих задач мониторинга, возможно многократное упрощение систем обработки данных за счет использования коммутаторов, гармонизации выходных сигналов сенсоров и уменьшения числа каналов обработки.

Ключевые слова: решетки сенсоров; опорный элемент; диаграмма направленности; функция корреляции; свертка; мониторинг; визуализация.

PLANAR ARRAYS OF SENSORS WITH SUPPORTING ELEMENT

Bashkatov I.P., Ph.D., assoc. prof., Email: ibashkatov@gmail.com
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the usage of planar arrays of sensors in tasks of wave emitting source monitoring. The correct processing of sensor array output data requires employment of synchronous multichannel receivers and adjustable signal delay devices in each channel. The complexity of physical implementation of systems with such components increases together with the number of array sensors and becomes unacceptable for large apertures. In such cases, for many tasks of monitoring, it is possible to simplify the data processing systems significantly by the use of commutators, sensor output signal harmonization and reduction of the number of the processing channels.

Keywords: arrays of sensors; supporting element; directivity pattern; correlation function; convolution; monitoring; visualization.

Введение

При мониторинге характеристик сигналов и местоположений источников излучения волн, во многих приложениях, используются неподвижные решетки сенсоров со сканирующими диаграммами направленности чувствительности. В частности, для определения местоположения источников радиоизлучения используются разнесенные пеленгационные системы с горизонтально расположенными антенными решетками [1], а для визуализации распределения на поверхности изделий источников звука применяются, так называемые, акустические камеры, содержащие решетки акустоэлектронных преобразователей, совмещенные с видеокамерами [2,3].

Если излучаемые сигналы широкополосные, то сканирование пространства диаграммами направленности (ДН) осуществляется компенсацией "разностей хода" волн от источника до элементов решетки, путем введения соответствующих задержек в цепях выходных электрических сигналов и анализом результатов их суммирования. Задержки аналоговых сигналов могут изменяться либо на дискретные интервалы времени, либо непрерывно, но в ограниченных пределах и часто с большими погрешностями.

В случае узкополосных сигналов, которые могут быть представлены комплексными амплитудами, компенсация разностей хода волн может быть сведена к умножению сигналов в каналах обработки на соответствующие комплексные фазовые множители.

Выделение из широкополосных выходных данных решеток доминирующих по интенсивности спектральных составляющих и представление их в форме комплексных амплитуд (в форме квадратур) в задачах мониторинга называют гармонизацией сигналов. Именно на базе "гармонизированных" данных осуществляется фазирование решеток в направлении источников излучения.

Оценка местоположения источников излучений

Ориентированные горизонтально плоские решетки датчиков напряженности поля используются для измерений уровней непреднамеренных электромагнитных излучений, выявления нелегальных радиопередатчиков и определение их местоположения, при решении задач информационной безопасности и во многих других случаях. Подобные измерительные системы снабжаются синхронными многоканальными радиоприемными устройствами (РПУ) с цифровой обработкой сигналов, позволяющей представить выходные сигналы датчиков в форме комплексных амплитуд.

Для анализа спектра и параметров электромагнитных излучений достаточно использовать один сенсор решетки и один, связанный с ним, канал РПУ, а для определения местоположения источника излучения необходимо использовать несколько каналов. Традиционные алгоритмы определения пеленгов источников радиоизлучений (ИРИ) базировались на том, что разнесенная на поверхности пара приемных элементов (ПЭ) позволяет определить направление поступления радиоволн, распространяющихся вдоль этой поверхности. Если \vec{d} – вектор, соединяющий фазовые центры пары приемных элементов (ПЭ), λ – длина волны излучения, а φ – угол между направлением распространения волн и нормалью к вектору \vec{d} , определяющему ориентацию пары, то направление движения волны можно определить из уравнения

$$\Delta\theta = \arctan \left[\frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} \right] = \frac{\pi \text{mod}(\vec{d})}{\lambda} \sin(\varphi), \quad (1)$$

где U_1 и U_2 – комплексные амплитуды выходных сигналов датчиков, измеренные двумя каналами синхронного РПУ.

Уравнение (1) справедливо лишь для случая, когда $\text{mod}(\vec{d}) < \lambda/2$ и кроме этого, оно имеет неопределенность в форме двух зеркально симметричных решений. Устранить неопределенность решений можно только с помощью дополнительной пары ПЭ, подобной первой но с другой ориентацией вектора \vec{d} , причем для обработки выходных сигналов этой пары элементов следует использовать дополнительные каналы синхронного РПУ. Использование двух пар ПЭ, не одинаково ориентированных, дает возможность избежать неопределенности оценки пеленга источника и увеличить ее точность.

Если вместо двух пар элементов можно использовать только три элемента, расположенные так, чтобы их фазовые центры составляли вершины равностороннего треугольника. В этом случае для обработки сигналов потребуется только три канала синхронного РПУ. Такое расположение ПЭ приводит к уменьшению числа каналов РПУ, к увеличению линейно независимых уравнений вида (1) и улучшению оценки пеленга.

Трехэлементная решетка сенсоров является кольцевой эквидистантной решеткой с минимально возможным числом элементов. При решении задач круговой пеленгации она имеет минимально возможную апертуру, не достигающей половины длины волны излучения. Увеличение апертуры решетки возможно только путем увеличения количества ПЭ, а для улучшения качества пеленгации их следует располагать в вершинах правильных многоугольников. Однако увеличение количества ПЭ решетки требует пропорционального увеличения числа каналов синхронного РПУ.

Используя высокочастотные коммутаторы, можно уменьшить число синхронных каналов РПУ в системе обработки сигналов. Однако при этом время обработки сигналов резко возрастет и не только потому, что измерение сигналов от приемных элементов проводится не одновременно, а последовательно, но также и потому, что после каждого шага переключения в цепях обработки сигналов, особенно в цепях Основной Селекции Сигналов (ОСС) РПУ, возникают переходные процессы. Поэтому измерения сигналов датчиков после каждого переключения коммутатора, становятся возможными лишь после того, как закончатся эти переходные процессы. Длительность указанных переходных процессов определяются свойствами фильтров ОСС и увеличивается с ростом их избирательности.

Тем не менее, системы с двухканальными синхронными РПУ и высокочастотными быстродействующими коммутаторами вполне справляются с задачами пеленгования стационарных радиосигналов.

Двухканальная система обработки данных решетки может иметь два коммутатора сигналов, по одному в каждом канале РПУ, или один коммутатор в цепи одного канала. В первом случае решетка разбивается на две вложенные подрешетки, например, такие, чтобы в одну подрешетку входили элементы с нечетными, а в другую – с четными номерами. Каждый коммутатор может подключаться только к элементам своей подрешетки. Во втором случае, коммутатор может подключать к одному из входов синхронного РПУ любой без исключения элемент решетки, а к другому входу РПУ постоянно подключен дополнительный приемный элемент, не входящий в решетку, который называют опорным.

Для того, чтобы "опросить" все возможные соседние пары элементов решетки в системе с двумя коммутаторами, необходимо, чтобы коммутаторы переключались поочередно, по одному на каждом шаге перехода к другой паре. Поэтому в системах с одним коммутатором и с двумя коммутаторами количество шагов переключений одинаковое.

Для многих задач радио мониторинга прерывание сигналов, скачки фазы и амплитуды, а также переходные процессы в цепях ОСС, являются неприемлемыми. Поэтому актуальным является анализ работы таких систем, у которых хотя бы на один канал обработки сигналы поступают без участия коммутаторов. Если такие задачи не предусмотрены мониторингом, в качестве опорного может быть выбран любой элемент регулярной решетки.

Определение местоположения источников излучения на местности возможно лишь с помощью нескольких разнесенных систем оценки пеленга. При заданном числе элементов антенной решетки и заданной максимальной частоте источников, требованию минимальной ширины диаграммы направленности, одинаковой по всем пеленгам удовлетворяет только кольцевые эквидистантные решетки [4-6].

Поскольку время опроса элементов решетки не зависит от числа коммутаторов, рассмотрим синхронную двухканальную систему с одним коммутатором содержащую плоскую решетку из N одинаковых приемных элементов, фазовые центры которых находятся в одной плоскости, и дополнительный опорный приемный элемент, не входящий в решетку.

Введем декартову систему координат (x, y, z) так, чтобы ее начало совпадало с фазовым центром решетки, а фазовые центры элементов решетки находились в одной плоскости $z=0$. Опорный приемный элемент может располагаться во внутренней или во внешней области решетки, он может располагаться в плоскости $z=0$ или вне этой плоскости.

Если мониторингу подвергаются источники электромагнитных волн, то для упрощения анализа пренебрежем взаимной электромагнитной связью между приемными элементами, и будем считать датчики электромагнитного поля инвариантны к поляризации электромагнитных волн. Развернем решетку так, чтобы один из ее элементов располагался на оси x . Этому элементу присвоим номер 1 и от него будем отсчитывать номера остальных элементов.

Пусть решетка датчиков напряженности электромагнитного поля облучается плоской волной с напряженностью электрической компоненты поля

$$E(x, y, z) = E_m \sin(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r} + \mathcal{G}). \quad (2)$$

Здесь: (x, y, z) - координаты точки наблюдения; ω и t - частота источника излучения и текущее время; $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \vec{n}$ - волновой вектор; \vec{n} - единичный вектор, нормальный к фазовому фронту волны (ориентация в пространстве этого вектора произвольная и подлежит определению в процессе мониторинга источников излучения); \vec{r} - радиус вектор, проведенный из начала системы координат в точку наблюдения; \mathcal{G} - начальная фаза, включающая компоненту, обусловленную модуляцией. Последняя компонента изменяется во времени, но существенно медленнее несущей частоты.

Такой вид имеет волна, падающая на решетку, когда при нулевом пеленге источника радиоизлучения волновой вектор \vec{k} лежит в плоскости (x, z) и направлен в сторону уменьшения значений координат x и z . Важным фактором, существенно влияющим на работу систем мониторинга, является тот факт, что решетки ПЭ практически всегда удалены от входов каналов синхронной обработки данных на расстояния, многократно превышающие шаг решетки. Поэтому алгоритм обработки данных должен использовать данные калибровки фидеров снижения в рабочем диапазоне частот, либо должен исключать влияние фидеров снижения на результаты измерений.

Пусть сигнал, поступающий на один из входов синхронного РПУ от опорного элемента, с точностью до фазового слагаемого \mathcal{G} имеет вид

$$u_{on} = u_{m.on} \sin[\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r}_{on} - \psi_{on}], \quad (3)$$

а сигналы от приемных элементов решетки, поступающие через коммутатор на другой вход синхронного РПУ, имеют (с точностью до фазового слагаемого \mathcal{G}) вид

$$u_n = u_{m.n} \sin[\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r}_n - \psi_n]. \quad (4)$$

В двух последних выражениях введены обозначения: \vec{r}_{on} и \vec{r}_n - радиусы – векторы, проведенные из начала системы координат к фазовым центрам опорного элемента и элементов решетки;

$$\psi_{on} = 2\pi \frac{l_{on}}{\lambda_g} \text{ и } \psi_n = 2\pi \frac{l_c + \tilde{l}_c + \Delta\tilde{l}_n}{\lambda_g} \quad (5)$$

- "набеги" фаз в трактах передачи сигналов от приемных элементов до РПУ, причем l_{on} и l_c - длина фидеров снижения; \tilde{l}_c и $\Delta\tilde{l}_n$ - средняя длина и разброс длины кабелей, соединяющих коммутатор с приемными элементами решетки; λ_g - длина волны в фидерах снижения и указанных кабелях.

При мониторинге источников излучения последовательно выполняются следующие операции. Коммутатор последовательно подключается к выходам элементов решетки. Поступившие по фидерам снижения сигналы в каналах РПУ синхронно преобразуются к промежуточной частоте, оцифровываются, преобразуются к нулевой частоте и сводятся к форме комплексных амплитуд. Комплексные амплитуды, соответствующие сигналам от приемных элементов решетки, делятся на комплексные амплитуды, соответствующие сигналам от опорного элемента. С необходимой временной задержкой коммутатор переключается к выходу следующего элемента.

По окончании полного цикла переключений коммутатора, формируются:

- сигнальный вектор \vec{A} с элементами a_n , представляющими собой нормированные выходные сигналы элементов решетки

$$a_n = a \cdot \exp \left\{ j \left[\vec{k} \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_{on}) + \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot (l_{on} - l_c - \tilde{l}_c - \Delta\tilde{l}_n) - \alpha \right] \right\}, \quad (6)$$

где α – разность сдвигов фазы сигналов в каналах РПУ, a – отношение чувствительности элементов решетки и опорного элемента;

- вектор опорного сигнала \vec{B} с элементами b_n , равными

$$b_n = \exp \left\{ -j \left[\hat{k} \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_{on}) \right] \right\}, \quad (7)$$

причем \hat{k} – волновой вектор опорного пространственного сигнала, т.е. вектор оценки вероятного направления распространения волны от источника излучения;

- коэффициент корреляции, равный скалярному произведению сигнального и опорного векторов $C = \vec{A} \cdot \vec{B}$, которое равносильно выражению

$$C = a \cdot \exp \left\{ j \left[-(\vec{k} - \hat{k}) \cdot \vec{r}_{on} + \phi - \alpha \right] \right\} \cdot \sum_{n=1}^N \exp \left\{ j \left[(\vec{k} - \hat{k}) \cdot \vec{r}_n - \Delta\phi_n \right] \right\}, \quad (8)$$

в которое входят величины $\phi = \frac{2\pi}{\lambda_g} (l_{on} - l_c - \tilde{l}_c)$ и $\Delta\phi_n = \frac{2\pi}{\lambda_g} \Delta\tilde{l}_n$ - фазовые слагаемые,

зависимые от частоты сигналов источников излучения, но не зависящие от направления движения волны, облучающей решетку.

Путем калибровки, можно для каждой частоты ω измерить фазовые слагаемые ϕ , α и $\Delta\phi_n$, ввести их в выражения (6) для элементов a_n и свести их к виду

$$a_n = a \cdot \exp \left\{ j \left[\vec{k} \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_{on}) \right] \right\}. \quad (9)$$

С учетом результатов калибровки выражение (8) для коэффициента корреляции принимает вид

$$C = a \cdot \exp \left\{ -j \left[(\vec{k} - \hat{k}) \cdot \vec{r}_{on} \right] \right\} \cdot \sum_{n=1}^N \exp \left\{ j \left[(\vec{k} - \hat{k}) \cdot \vec{r}_n \right] \right\}. \quad (10)$$

Выражение (10) для коэффициентов корреляции, часто называемое сверткой, справедливо при произвольном расположении опорного приемного элемента относительно других элементов решетки. Если опорный элемент расположен в центре кольцевой решетки, то $\vec{r}_{on} = 0$, правая часть (9) упрощается и коэффициент корреляции становится равным

$$C = a \cdot \sum_{n=1}^N \exp \left\{ j \left[(\vec{k} - \hat{k}) \cdot \vec{r}_n \right] \right\}. \quad (11)$$

Отметим, что формула (11) описывает диаграмму направленности излучения или чувствительности в поле плоских волн решетки однородных изотропных приемных элементов, сфазированной в направлении вектора \vec{k} . В вершине главного лепестка диаграммы направленности коэффициент корреляции максимален и принимает значение $C = N \cdot a$. Если апертура решетки достаточно большая, ее диаграмма направленности имеет дополнительные лепестки, которые называют боковыми. Причем модуль C в вершинах боковых лепестков уменьшается с ростом номера лепестка, а фаза скачком изменяется на π при переходе из области одного лепестка в область соседнего. В главном лепестке ДН коэффициенты корреляции положительные, в двух первых боковых лепестках, симметричных относительно главного, коэффициенты корреляции отрицательные, в двух вторых боковых лепестках коэффициенты корреляции положительные и т.д. Это упрощает процедуру определения пеленга ИРИ, поскольку можно исключить локальные экстремумы ДН с отрицательным знаком коэффициентов C .

Описанные процедуры обработки данных решеток позволяют определять направление движения волн только в том случае, если доступен корректный способ калибровки трактов прохождения сигналов от элементов решеток до входов системы их син-

хронной обработки. В свою очередь, корректная калибровка трактов возможна только в случае, если существует источник волн, синфазно облучающих все элементы решетки. Такой способ калибровки может быть реализован только для кольцевых решеток, поместив тестовый излучатель на их геометрической оси.

Приемные элементы систем радио мониторинга (вибраторные антенны) обладают тем свойством, что даже при идеальном согласовании с волноводными трактами передачи сигналов в режиме пассивного приема электромагнитных волн они излучают в окружающее пространство ровно столько энергии, сколько передают в тракты. При неидеальном согласовании излучается больше энергии, чем принимается. Поэтому все элементы решетки, включая и центральный, создают в режиме приема коллективное поле рассеяния, которое деформируется при работе антенного коммутатора. Это приводит к ошибкам измерения структуры поля волн, подлежащих мониторингу, и делает практически непригодным использование приемного элемента, расположенного в центре кольцевой решетки, для качественного анализа информации, передаваемой волнами.

В том случае, когда опорный приемный элемент не расположен в центре решетки и удален от нее, когда нет возможности провести калибровку фидеров снижения, для нужд пеленгации можно использовать модуль коэффициента корреляции по формуле (8). Если решетка кольцевая, эквидистантная, имеет четное количество элементов и разброс длины кабелей, соединяющих элементы решетки с коммутатором пренебрежимо мал по сравнению с длиной облучающей волны, то модули правых частей выражений (8) и (11) будут совпадать.

При облучении идеальной решетки плоской волной и при выполнении перечисленных к решетке требований, модули коэффициентов корреляции C и диаграмм направленности в вершинах главных лепестков, при прочих равных условиях, совпадают по величине. Однако, если решетка находится в поле интерферирующих волн, результаты пеленгования, полученные с помощью коэффициентов C и $\text{mod}(C)$, оказываются не одинаковыми.

Вернемся к сигнальному вектору \vec{A} , элементы a_n которого формируются из данных решетки путем измерений сигналов от ее приемных элементов. Образует модифицированный сигнальный вектор \hat{A} с элементами $\hat{a}_n = a_n/a_1$, $1 \leq n \leq N$. Согласно формулы (6), элементы модифицированного вектора будут равны

$$\hat{a}_n = \exp \left\{ j \left[\vec{k} \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_1) - \frac{2\pi\Delta\tilde{l}_n}{\lambda_g} \right] \right\}. \quad (12)$$

Образуем модифицированный вектор опорного сигнала $\widehat{\vec{B}}$ с элементами равными $\widehat{b}_n = b_n/b_1$, $1 \leq n \leq N$. Согласно формулы (7), эти элементы будут равны

$$\widehat{b}_n = \exp \left\{ -j \left[\widehat{k} \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_1) \right] \right\}. \quad (13)$$

Скалярное произведение векторов $\widehat{C} = \widehat{\vec{A}} \cdot \widehat{\vec{B}}$ представляет собой модифицированный коэффициент корреляции, равный

$$\widehat{C} = \sum_{n=1}^N \exp \left\{ j \left[(\vec{k} - \widehat{k}) \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_1) - \frac{2\pi\Delta\tilde{l}_n}{\lambda_g} \right] \right\}. \quad (14)$$

Главными отличиями этого выражения от формулы (8) для "классического" коэффициента корреляции является то, что в него не входят параметры фидеров снижения (и сам факт наличия таковых) а также координаты опорного элемента (и факт его наличия). Следовательно, для получения модифицированных коэффициентов корреляции (14) по результатам натурных измерений не требуется проводить калибровку фидеров снижения и трактов РПУ, а также не требуется информация о местоположении опорного приемного элемента. Он может быть расположен на произвольном расстоянии от антенной решетки и не нужно брать модуль \widehat{C} при пеленговании ИРИ.

Источником погрешностей может быть лишь разброс сдвига фазы в трактах, соединяющих приемные элементы решетки с фидером снижения, а именно $\Delta\phi_n = 2\pi\Delta\tilde{l}_n/\lambda_g$. Этот разброс проявляется на частотах, исчисляемых гигагерцами тем сильнее, чем выше рабочая частота. Впрочем, решетка на таких частотах весьма компактная, ее калибровка может проводиться в лабораторных условиях.

Отсутствие необходимости калибровки фидеров снижения снимает требование к форме решеток, чтобы они были непременно кольцевыми. Выражения для модифицированных коэффициентов корреляции остаются справедливыми для любой конфигурации решеток, при этом они не обязательно должны быть плоскими.

Последовательное формирование коэффициента корреляции, по его фрагментам для всех пар сенсоров решетки, подобно последовательному синтезу апертуры диаграммы направленности. Время формирования может быть сокращено путем представления решетки совокупностью подрешеток, что требует увеличения количества коммутаторов и каналов синхронной обработки сигналов.

Пусть число синхронной обработки сигналов равно $1 + p$, $p = 2, 3, \dots$ - целое число больше 1. Рассмотрим частный случай, когда количество приемных элементов антенной решетки кратно p , т.е. когда $N = M \cdot p$. С учетом этого, разобьем кольцевую ре-

сетку из N элементов на p подрешеток по M элементов каждая так, чтобы каждый элемент исходной решетки входил в состав какой либо подрешетки. Подрешетки должны располагаться в пространстве последовательно друг за другом, причем могут пересекаться и быть вложены друг в друга.

Пронумеруем приемные элементы подрешеток двойными индексами im , обозначив буквой $i = 1, \dots, p$ номер подрешетки, а $m = 1, \dots, M$ - номер элемента в подрешетке. Эти индексы будем присваивать ко всем величинам, относящимся к соответствующему приемному элементу.

Коммутаторы синхронно подключаются к выходам приемных элементов всех подрешеток. В каждом канале синхронного РПУ сигналы, оцифрованные, приведенные к нулевой частоте и сведенные к форме комплексных амплитуд делятся на комплексную амплитуду сигнала от опорного приемного элемента. По окончании цикла опроса элементов формируются парциальные сигнальные векторы \vec{A}_i ($i = 1, \dots, p$) с элементами a_{im} , равными

$$a_{im} = a \cdot \exp \left\{ j \left[\vec{k} \cdot (\vec{r}_{im} - \vec{r}_{on}) + \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot (l_{on} - l_{ci} - \tilde{l}_{ci} - \Delta \tilde{l}_{im}) - \alpha_i \right] \right\}. \quad (15)$$

Здесь использованы те же обозначения, что и для сигнального вектора \vec{A} из (6).

В каждой i -той подрешетке выбирается приёмный элемент и на его выходной сигнал делятся все элементы сигнального вектора \vec{A}_i . Тем самым образуются модифицированные сигнальные векторы \hat{A}_i с элементами \hat{a}_{im} , равными

$$\hat{a}_{im} = \exp \left\{ j \left[\vec{k} \cdot (\vec{r}_{im} - \vec{r}_{i1}) - \Delta \phi_{im} \right] \right\}, \quad (16)$$

где $\Delta \phi_{im} = \frac{2\pi \Delta l_{im}}{\lambda_g}$. Как и в случае использования одного коммутатора, при изготовлении решетки, разброс длины соединительных кабелей может быть сведен до таких малых величин, что он не будет влиять на точность измерений сигналов.

Кроме этого, формируются модифицированные парциальные векторы опорного сигнала \hat{B}_i с элементами

$$\hat{b}_{im} = \exp \left\{ -j \left[\hat{k} \cdot (\vec{r}_{im} - \vec{r}_i) \right] \right\}. \quad (17)$$

Скалярное произведение парциальных сигнальных векторов и парциальных векторов опорного сигнала образует коэффициент корреляции соответствующей подрешетки

приемных элементов. В свою очередь, сумма коэффициентов корреляции всех подрешеток

$$\widehat{C} = \sum_{i=1}^p \widehat{A}_i \cdot \widehat{B}_i \quad (18)$$

есть коэффициент корреляции решетки с несколькими подрешетками.

Важным является то, что в последнее выражение не входят параметры фидеров снижения (как и факт их наличия), а также радиус – вектор \vec{r}_{on} , поэтому коэффициент корреляции (18), так же, как для случая рассмотренного выше двухканальной системы обработки, не зависит от местоположения опорного приемного элемента.

Сложность и стоимость одного канала "все диапазонного" синхронного РПУ на несколько порядков превышает сложность и стоимость одного приемного элемента и всей решетки. Именно поэтому, ценой ухудшения функциональных свойств систем мониторинга, приходится уменьшать количество каналов синхронных РПУ и использовать сигнальные коммутаторы. При использовании двухканального синхронного РПУ, одного сигнального коммутатора и одного опорного элемента, каждый цикл формирования данных решетки имеет количество шагов, равное числу элементов решетки, а скорость работы системы мониторинга оказывается самой низкой.

При использовании трехканального синхронного РПУ и двух сигнальных коммутаторов, решетку можно разбить на две подрешетки, почти в два раза сократить количество шагов в цикле формирования данных решетки и во столько раз увеличить скорость работы системы. Можно дальше увеличивать количество каналов РПУ, число коммутаторов и подрешеток, увеличивая тем самым скорость работы системы. Самым большим количеством подрешеток, соответственно количеством коммутаторов и каналов синхронного РПУ может быть равно половине общего числа элементов решетки. Такая система, при наличии опорного приемного элемента, не требующая калибровки фидеров снижения будет иметь наибольшее быстроедействие.

Визуализация функций корреляции

Все выражения для коэффициентов корреляции содержат волновой вектор поля от источника излучения, поэтому они являются, для конкретной конфигурации решетки и на фиксированной частоте излучения, функциями пеленга и угла высоты места. В общем случае, как функция своих аргументов, коэффициент корреляции может иметь несколько максимумов из которых только один соответствует действительному направлению движения волн от источника излучения.

Поскольку направление движения волн неизвестно, то при наличии данных от решеток сенсоров, главный максимум приходится находить численными методами. Из этих методов самым медленным, но наиболее информативным является метод оценки, использующий построение 2D и 3D графиков функций корреляции.

Для построения этих графиков необходимо задавать частоту излучения источника, количество элементов решетки, их координаты на плоскости решетки, а также частоту источника излучения и данные решетки в форме сигнального вектора, представленного комплексными числами. Данные решетки формируются по результатам натурных измерений при мониторинге сигналов или могут быть вычислены аналитически, если проводится синтез решетки с заданными характеристиками.

Процедура построения графиков включает в себя циклы формирования векторов опорного сигнала и вычисления значений коэффициента корреляции для всех угловых координат полупространства, опирающегося на плоскость решетки.

Если между сенсорами решетки не существуют взаимных связей и если они не искажают своим присутствием волновое поле, то вычисление этих векторов, по известной структуре невозмущенного волнового поля и известной геометрии решетки, не представляет сложностей. Однако у решеток из вибраторных антенн существуют значительные взаимные связи между элементами [7]. Такие решетки сильно искажают окружающее их волновое поле, и это необходимо учитывать при формировании векторов опорного сигнала.

Угловые координаты вектора опорного сигнала изменяют с заданными шагами и тем самым формируют массивы для построения графиков. При фиксированных значениях угла места или пеленга получают массивы для построения 2D - диаграмм направленности соответственно по пеленгу или углу высоты. Графики таких диаграмм строят в декартовой или полярной системах координат. В общем случае получают массивы для построения 3D – диаграмм направленности в пространстве или, что тоже, функций корреляции сигнального и опорного сигналов.

Важно учесть, что угловые координаты источников излучения соответствуют угловым координатам, при которых функция корреляции достигает главного максимума. Поэтому, при анализе зависимости потенциальной точности оценки местоположения источников излучения от геометрии решеток, можно эмитировать сигнальные векторы и формировать векторы опорного сигнала полагая, что взаимодействия между элементами отсутствуют, а решетки не искажают структуры первичного волнового поля. Положение в пространстве главного максимума функции корреляции идеализированной решетки будет точно таким же, как и положение главного максимума функции корреляции

ляции реального сигнального вектора данных решетки и вектора опорного сигнала, строго учитывающего взаимные межэлементные связи. Хотя эти функции корреляции могут сильно различаться, но положение их максимумов будут совпадать.

Обработку данных решеток, полученных при натуральных измерениях или с помощью эмулятора, удобно проводить, например, с помощью виртуальных инструментов (VI) программной среды LabVIEW. Передняя панель примера такого виртуального инструмента показана на рис. 1.

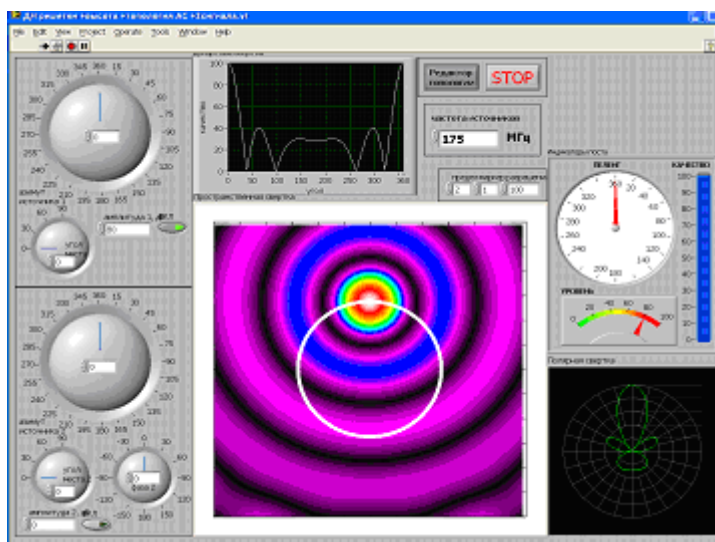


Рис. 1. Общий вид передней панели VI LabVIEW при построении ДН решеток.

Этот виртуальный инструмент можно использовать, например, для анализа зависимости вида функции корреляции вектора опорного сигнала и сигнального вектора данных решетки от ее геометрии и количества элементов. Эмулятор решетки формирует данные, соответствующие интерференционному полю двух лучей разной интенсивности от одного источника.

Диаграммы направленности по пеленгу, при фиксированных углах места, отображаются на передней панели 2D – диаграммами в прямоугольной и полярной системах координат. 3D – график помещен в центре передней панели. Он строится в декартовой системе координат, причем по осям X и Y откладываются проекции волнового вектора сигнала от источника излучения, а величина коэффициента корреляции (двухмерной функции корреляции) задается цветовым кодом.

Белая окружность на 3 – мерном графике соответствует геометрическому месту точек максимальных значений проекций волнового вектора сигналов от источника на плоскость решетки. Положению максимума функции корреляции на белой окружности соответствует движению волны параллельно плоскости решетки. Положению макси-

мума функции корреляции в центре круга соответствует нахождение источника в зените, когда волны поступают перпендикулярно плоскости решетки. Точкам графика, расположенным внутри круга, ограниченного белой окружностью, соответствуют действительны углы падения волн, а точкам, лежащим вне этого круга (за белой окружностью), соответствуют мнимые углы падения волн на плоскость решетки. В теории антенн таковые используются.

Программная среда LabVIEW позволяет строить трехмерные графики и для удобства как угодно разворачивать их. На рис.2. представлен пример "развернутого" трехмерного графика функции корреляции (свертки) для двух источников излучения, разнесенных по пеленгу и углу места.

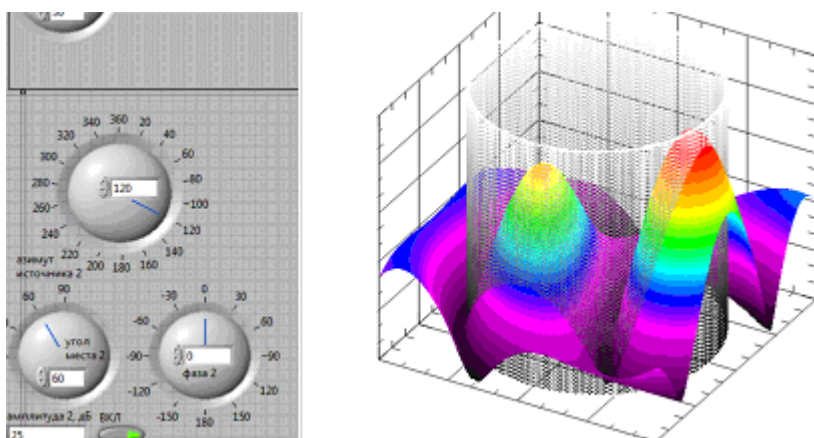


Рис.2. 3D – свертка сигналов от двух источников излучения.

Нижняя поверхность графика соответствует плоскости решетки, на которую проектируется волновой вектор волны от источника излучения, размерность осей – обратные метры. По вертикальной оси откладывается безразмерная величина функции корреляции.

Если 3D – график построить не в переменных, пропорциональных углу падения волн на плоскость решетки, а в тангенсах углов падения, то решетку датчиков поля можно совместить с видеокамерой. В этом случае можно получать изображение объекта или инфраструктуры окружающей среды, на котором цветовым пятном отмечено положение источника излучения.

С учетом описанных выше процедур построена математическая модель акустической камеры с кольцевой решеткой в виде submodule виртуального прибора (SubVI LabVIEW), передняя панель которого показана на рис. 3.

На передней панели submodule размещены окна, для задания: параметров решетки (радиус решетки и количество сенсоров); угловых координат и частоты источника из-

лучения; размер "акустического изображения" в пикселях по горизонтали и по вертикали, радиус кольцевой решетки, число элементов решетки, частота спектральной линии, выбранной из спектра источника звука, а также окно для отображения функции корреляции в форме 3D Graph.

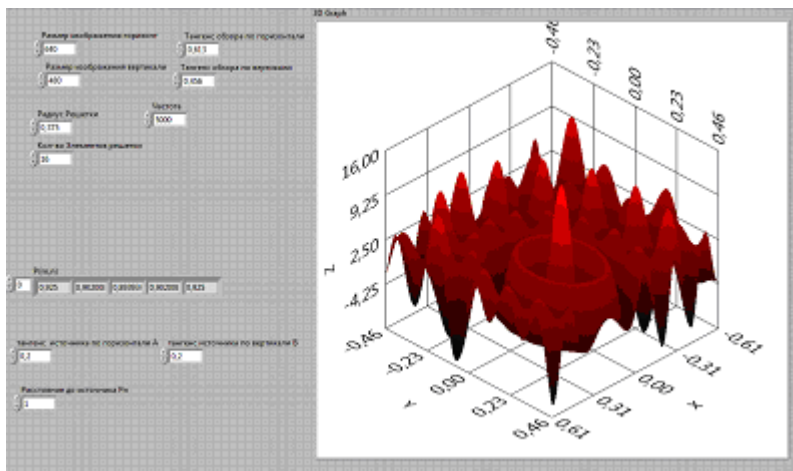
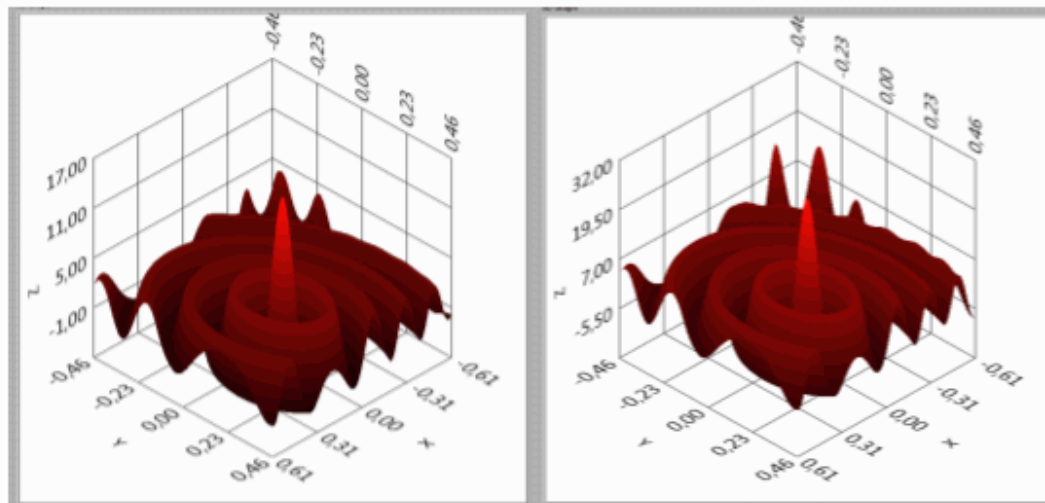


Рис. 3. Лицевая панель SubVI LabVIEW акустическая камера с графиком двумерной свертки.

Параметры решетки: радиус $R = 0,375$ м; число элементов $N = 16$; угловые координаты источника $X = \tan(\alpha) = 0,2$, $Y = \tan(\beta) = 0,2$; $F = 5000$ Гц.

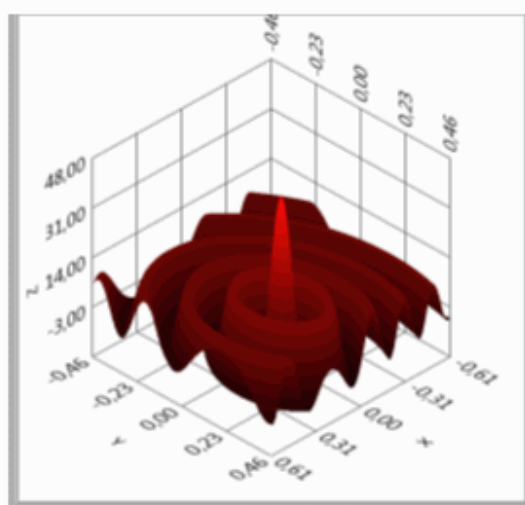
По осям X и Y трехмерного графика отложены значения тангенса угловых координат пространства, в котором могут располагаться источники звука. Это наиболее удобная форма задания координат для совмещения "акустического" изображения от акустической решетки и оптического изображения от видеокамеры. По оси Z отложены численные значения функции корреляции.

Субмодуль "акустическая решетка" был использован в качестве самостоятельного виртуального прибора для анализа пространственных диаграмм направленности решетки с неизменным радиусом, неизменными местоположением источника звука и частотой его спектральной линии, но с разным числом элементов. График функции корреляции, представленный на рис. 3 был дополнен подобными графиками, полученными при других количествах элементов решетки. Они приведены на рисунках 4 и 5.



a)

b)



с)

Рис. 4. Графики функции корреляции решетки с одинаковым радиусом и разным числом элементов N :

- a) – 17 элементов;
- b) – 32 элемента.
- c) – 48 элементов.

Из сравнения графиков двумерных сверток, приведенных на рис. 3 и 4а, видно, что уровни боковых лепестков у решетки с нечетным количеством элементов существенно ниже, чем у решетки с четным количеством элементов. Характер боковых лепестков, приведенный на рис. 3 весьма мало изменяется, при увеличении количества элементов с 16 – ти до 18 – ти. Даже при удвоении количества четных элементов с 16 – ти до 32 – х, боковые лепестки остаются выше, чем у решетки с 17 – ю элементами, см. рис. 4б). Ложные боковые лепестки полностью пропадают при увеличении четного количества элементов до 48 – ми, см. рис. 4с).

Отметим, что на рисунках 3 и 4 приведены графики двумерных функций корреляции кольцевой эквидистантной решетки, угловые координаты которых ограничены пределами прямоугольной угловой апертуры, такими, как у стандартных видеокамер.

Список литературы

1. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. - М.: Горячая линия-Телеком, 2012. — 648 с.
2. E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound Source Reconstructions Using a Microphone Array," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, 340 – 344, 1980.
3. A. Sarkissian, "Extension of a Measurement Surface in Near-Field Acoustic Holography," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, 1593 – 1596, 2004.
4. Башкатов И.П., Киселев Г.Л., и др. Сопротивления связи приемных элементов кольцевых антенных решеток. // "INTERMATIC-2007" / Материалы Международной НТК. 23-27 октября 2007 г. Москва. – М.: МИРЭА. 2007. с.159 -166.
5. Башкатов И.П., Киселев Г.Л. и др. Свертки комплексных сигналов антенных решеток. // "INTERMATIC – 2008, часть 4", Материалы V Международной НТК 10 – 13 ноября 2008, г. Москва. – М.: МИРЭА, 2009, с. 10 – 15.
6. Башкатов И.П., Козлов М.С. и др. Корреляционный интерферометр с опорным приемным элементом. // "INTERMATIC – 2009, часть 3", Материалы VII Международной НТК 7– 11 декабря 2009, г. Москва. – М.: МИРЭА, 2009, с. 92 – 96.
7. Хансен З.С. Фазированные антенные решетки. - М.: Техносфера, 2012.– 560 с.