

Алгоритм совместной обработки двух диапазонов частот с использованием модели затухающего экспоненциального рассеяния

В. В. Владимиров, Н. А. Пересторонний, Б. С. Ставцев

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

vka@mil.ru

Аннотация. Представлены расчеты параметров модели затухающего экспоненциального рассеяния сигнальной характеристики. Модель позволяет повторить частотную характеристику в выбранном диапазоне с высокой точностью. Предложен алгоритм совместной обработки сигнальных данных в разнесенных по частоте диапазонах, на основе которого выполнена интерполяция отсутствующего промежутка по частоте. Раскрыты особенности выбора порядка модели на основе анализа сингулярных чисел. Выполнено статистическое моделирование для иллюстрации результативности предложенного решения на основе представленных выводов. Проведен анализ полученных результатов на примере модели наблюдаемого объекта простой формы.

Ключевые слова: *всеполусная модель; частотная характеристика; порядок модели; сингулярные числа; шумовое подпространство; полюсы; дальностный портрет*

I. ВВЕДЕНИЕ

К современным средствам наблюдения в радиолокационном диапазоне предъявляются жесткие требования по решению задач своевременного обнаружения, устойчивого траекторного сопровождения и надежного определения типа наблюдаемого объекта (классификации). Сложность решения этих задач, а также ряда других сопутствующих, зачастую увеличивается из-за постоянной модернизации технических характеристик наблюдаемых объектов (изменения конструкции и используемых материалов).

Заблаговременное обнаружение и сопровождение объектов возможно при использовании большинства современных средств, работающих на высоких частотах, однако не все они обладают высокой разрешающей способностью, позволяющей достоверно классифицировать наблюдаемый объект [1].

Разрешающей способностью определяется качество разделения сигналов по любому из параметров, например, задержке, смещению угловых координат и т. п. В данной работе исследуется вопрос повышения разрешающей способности по дальности при использовании подхода, основанного на совместной обработке двух диапазонов частот. Повышение разрешающей способности по дальности может быть достигнуто использованием большого количества известных методов, таких как изменение структуры сигнала (уменьшение длительности импульса, применение широкополосных сигналов с линейной частотной или фазовой модуляциями [2–4]), а также применение методов специальной обработки сигналов (методов сверхразрешения) [5–7].

Выбор используемого метода основывается на эффективности результатов относительно полученных данных, а также объема вычислительной нагрузки при совершении операций данного метода. К примеру, методы, связанные с изменением структуры сигналов накладывают серьезные требования к оборудованию, используемому при приеме и первичной обработке радиолокационного сигнала, а методы сверхразрешения – к вычислительным возможностям средства, на котором выполняется обработка.

Существующие методы сверхразрешения делятся на параметрические (MUSIC, ESPRIT и т.д.) и непараметрические (Capon и т.д.). Непараметрические методы обходятся без априорной информации о наблюдаемом объекте, но и имеют, в свою очередь, худшие показатели разрешения по сравнению с параметрическими. Параметрические методы требуют априорные данные об объекте, что влечет дополнительную нагрузку из-за выполнения операций по определению количества доминирующих сигнальных компонент (методы MDL, AIC и т.д.).

В этих условиях актуальность приобретают исследования, направленные на поиск путей, обеспечивающих максимальное повышение разрешающей способности без изменения аппаратной конфигурации и с минимальными вычислительными нагрузками.

II. АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДВУХ ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЗАТУХАЮЩЕГО ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ

В последние годы, с целью повышения разрешающей способности, возрос интерес к слиянию разреженных диапазонов частот радиолокационных сигналов. Как известно, в системах со сжатием импульса разрешающая способность по дальности Δr определяется выражением [1]:

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta F}, \quad (1)$$

где c – скорость света; ΔF – ширина спектра зондирующего сигнала.

Под слиянием разреженных по частоте измерений подразумевается интерполяция отсутствующей полосы пропускания между двумя диапазонами, позволяющая восстанавливать выборки данных, находящиеся за пределами широкополосных радиолокационных измерений [8–10]. Исходя из содержания подобных источников, техника слияния радиолокационных

сигналов позволяет достичь более широкополосной обработки путем объединения частотных характеристик объектов от двух или более локаторов без изменения их аппаратного обеспечения.

Чтобы выполнить предложенную обработку, необходимо сопоставить подходящую модель, соответствующую измерениям как в верхнем, так и в нижнем частотных диапазонах. Сопоставленная модель сигнала должна точно соответствовать локальным механизмам рассеяния, присущим наблюдаемому объекту заданной геометрической формы и обеспечивать достоверную интерполяцию нижнего диапазона вверх по частоте, а верхнему, вниз по частоте. Возможность сопоставления сигнальным измерениям адекватной математической модели основана на предположении, что рассматриваемый объект может быть точно охарактеризован суперпозицией дискретных рассеивающих элементов.

При моделировании, в качестве исходных данных были использованы выборки результатов наблюдения (частотные характеристики) объекта, состоящего из пяти локальных центров рассеяния. Имитировалось наблюдение станциями, функционирующими на частотах F_1 от 10 до 11 ГГц и F_2 от 13 до 14 ГГц (ширина спектра у обоих $\Delta F = 1$ ГГц).

В результате согласованного приема и первичной обработки радиолокационного сигнала, частотная характеристика наблюдаемого объекта может быть описана с использованием геометрической теории дифракции [8] и представлена выражением:

$$s(n) = \sum_{k=1}^K A_k \left(j \frac{f_n}{f_1} \right)^{\alpha_k} e^{-j \frac{4\pi f_n R_k}{c}}, \quad (2)$$

где n – номер отсчета по частоте; k – номер блестящей точки; A_k – амплитуда; f_n – частотные точки диапазона; f_1 – начальная частота диапазона; α_k – частотно-зависимый коэффициент; R_k – расстояние от ЦМ до блестящей точки.

На рис. 1 представлены вещественные части частотной характеристики в нижнем и верхнем диапазонах.

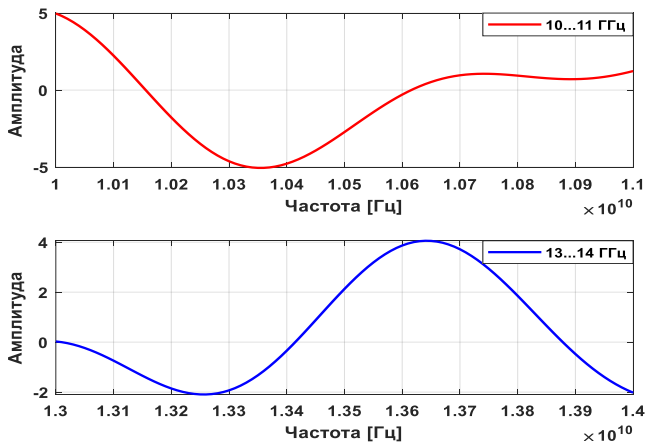


Рис. 1. Частотная характеристика в нижнем и верхнем диапазонах

На основе обработанных измерений после выполнения операций быстрого преобразования Фурье формируются дальностные профили (дальностные портреты) наблюдаемого объекта. На рис. 2 представлены дальностные портреты на основе частотной характеристики верхнего и нижнего поддиапазонов.

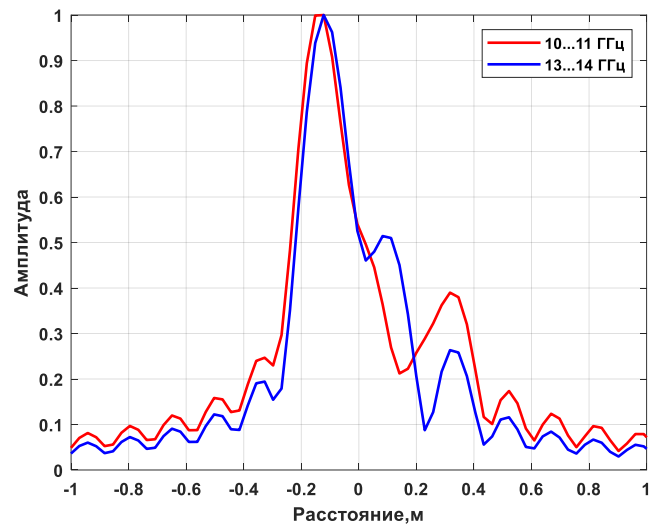


Рис. 2. Дальностные портреты на основе частотной характеристики нижнего верхнего поддиапазонов

Из представленных результатов видно, что точного числа центров рассеяния на объекте определить невозможно. Несмотря на то, что обе исходные выборки имеют одинаковую ширину полосы $\Delta F = 1$ ГГц, в верхнем диапазоне на расстоянии 0,1 м от центра наблюдается дополнительная отметка, которой нет в нижнем. Исходя из анализа полученных результатов моделирования, можно сделать вывод, что данного разрешения недостаточно и требуется применение методов сверхразрешения для задачи определения количества центров рассеяния.

Как было сказано ранее, для выполнения предложенной обработки необходимо сопоставить подходящую модель, соответствующую измерениям в верхнем и в нижнем частотных диапазонах. Данная модель имеет вид [9]:

$$M(n) = \sum_{k=1}^K d_k p_k^n, \quad (3)$$

где $d_k = A_k \left(j \frac{f_n}{f_1} \right)^{\alpha_k} e^{\alpha_k \ln(f_1)} e^{-j \frac{4\pi f_1 R_k}{c}}$ – амплитудные выражения с частотно-зависимыми коэффициентами α_k , и $p_k = e^{\alpha_k \frac{\Delta f}{f_1}} e^{-j \frac{4\pi f_n R_k}{c}}$ – полюсы, характеризующие относительные дальности и спад частоты отдельных рассеивающих центров.

Подход к моделированию полюсов использует сингулярное разложение корреляционной матрицы Ганкеля. Форма матрицы выбрана из-за особенностей работы с исходными данными, так как необходимо увеличить ранг. Корреляционная матрица для нижнего диапазона задается в виде выражения:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & \cdots & S_{L-1} \\ S_1 & S_2 & \cdots & S_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N_1-L} & S_{N_1-L+1} & \cdots & S_{N_1-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где L – длина окна корреляции,
 S_n – измерения в частотной области;

Корреляционная матрица \mathbf{H}_2 для верхнего диапазона, построенная аналогичным образом, имеет вид:

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} S_{N-N_2} & S_{N-N_2+1} & \cdots & S_{N-N_2+L-1} \\ S_{N-N_2+1} & S_{N-N_2+2} & \cdots & S_{N-N_2+L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N-L} & S_{N-L+1} & \cdots & S_{N-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Чтобы оценить параметры всеполюсной модели для нижнего и верхнего диапазонов, необходимо применить сингулярное разложение к \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 , соответственно, которое декомпозирует их в произведение трех матриц:

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1' \quad (6)$$

и

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{U}_2 \mathbf{S}_2 \mathbf{V}_2', \quad (7)$$

где штрих (верхний символ) обозначает Эрмитов оператор (сопряжение). Матрицы \mathbf{S} содержат сингулярные значения для двух диапазонов. Матрицы \mathbf{U} и \mathbf{V} содержат соответствующие сингулярные векторы. Декомпозируя матрицы этим способом, на основе анализа величин сингулярных чисел можно оценить параметры многополюсной модели для каждого диапазона (определить доминирующие компоненты сигнальной составляющей). Относительно большие сингулярные значения \mathbf{S} соответствуют сильным компонентам сигнала, тогда как малые сингулярные значения обычно соответствуют шуму. Для низких уровней шума существует резкий переход между большими и малыми сингулярными значениями. Точка перехода может использоваться как оценка порядка модели.

Как только порядки моделей оценены, следует разложить подпространства \mathbf{V}_1 и \mathbf{V}_2 на подпространство «сигнала + шум» и «шумовое» подпространство:

$$\mathbf{V}_1 = [\mathbf{V}_1^{sn} \quad \mathbf{V}_1^n] \quad (8)$$

и

$$\mathbf{V}_2 = [\mathbf{V}_2^{sn} \quad \mathbf{V}_2^n]. \quad (9)$$

Данная операция важна, так как в дальнейшем полученные значения будут использованы для оценки полюсов вблизи единичной окружности каждого диапазона.

Разделение выполняется так, чтобы \mathbf{V}_1^{sn} и \mathbf{V}_2^{sn} имели столбцы P_1 и P_2 , соответственно. Матрицы шумового подпространства \mathbf{V}_1^n и \mathbf{V}_2^n имеют столбцы $L-P_1$ и $L-P_2$, соответственно.

Матрицы \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 определяются из векторов шумового подпространства для каждого диапазона как

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{V}_1^n \mathbf{V}_1^{n'} \quad (10)$$

и

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{V}_2^n \mathbf{V}_2^{n'}. \quad (11)$$

Необходимо сформировать полиномы $A_1(z)$ и $A_2(z)$, заданные как

$$A_1(z) = \sum_{i=1}^L a_{1i} z^{(i-1)} \quad (12)$$

и

$$A_2(z) = \sum_{i=1}^L a_{2i} z^{(i-1)} \quad (13)$$

где a_{1i} – элементы первой строки \mathbf{A}_1 и a_{2i} – элементы первой строки \mathbf{A}_2 .

Корни $A_1(z)$ и $A_2(z)$ соответствуют полюсным оценкам для нижнего и верхнего диапазонов (рис. 3).

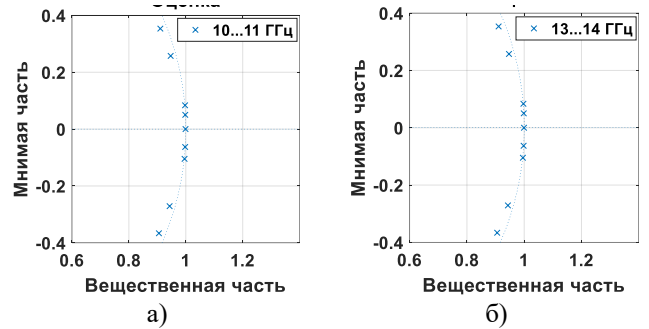


Рис. 3. Оценка полюсов нижнего и верхнего диапазонов

Оценки значений частотно-зависимых коэффициентов сигнала $\hat{\alpha}'_k$ могут быть найдены, используя выражение:

$$\hat{\alpha}'_k = \frac{(N-1) \ln(|\hat{p}_k|)}{\ln[1 + (N-1) \Delta f / f_1]}. \quad (14)$$

В качестве оценочных параметров полюсов \hat{p}_k используются значения, найденные ранее.

Уточненные оценки значений полюсов сигнала с использованием найденных значений \hat{R}_k и $\hat{\alpha}'_k$ рассчитываются с использованием выражения, которое имеет вид:

$$\hat{p}_k = e^{\hat{\alpha}'_k \hat{\alpha} \frac{\Delta f}{f_1} - j \frac{4\pi \hat{R}_k}{C} \Delta f} \quad (15)$$

Полученные значения из выражений (14) и (15) необходимо подставить в выражение (3). Таким образом формируется модель исходной частотной характеристики.

На рис. 4 представлены частотные характеристики и модели частотных характеристик в нижнем и верхнем диапазонах.

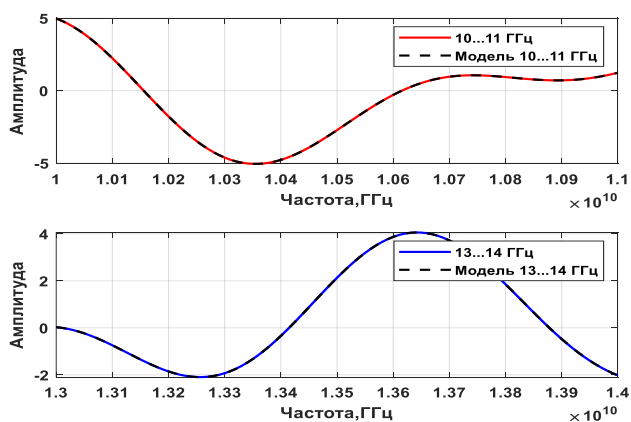


Рис. 4. Модель сигнала и сигнал на нижнем поддиапазоне

Из представленных результатов видно, что в нижнем и верхнем диапазонах модели точно совпадают с исходными частотными характеристиками. Данный факт свидетельствует о правильном определении количества сигнальных компонент и точном расчете необходимых коэффициентов для выражения (3). На рис. 4 изображены дальностные портреты наблюдаемого объекта, сформированные на основе моделей частотных характеристик в нижнем и верхнем диапазонах. Это вызывает необходимость экстраполяции сигнала на весь частотный диапазон.

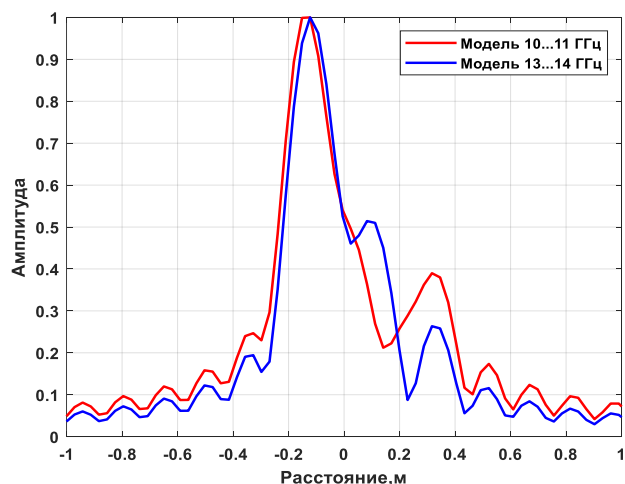


Рис. 5. Дальностные портреты на основе моделей в нижнем и верхнем диапазонах

После того, как модели сформированы точно, необходимо выполнить экстраполяцию нижнего диапазона вверх по частоте, а верхнего – вниз. Для выполнения данной операции необходимо в выражении (3) за n использовать количество дискретных точек по частоте, соответствующее объединенному диапазону.

На рис. 6 представлены результаты экстраполяции моделей частотных характеристик. Из результатов

видно, что экстраполированные значения на основе модели нижнего диапазона совпала идеально. Экстраполированные значения на основе исходных данных модели верхнего диапазона имеют ошибки в районе от 10,5 ГГц до 11,5 ГГц, но ошибки незначительные. Данные разноточия при формировании дальностных портретов явных искажений не дадут (рис. 7), зато значительно повысят разрешающую способность по дальности.

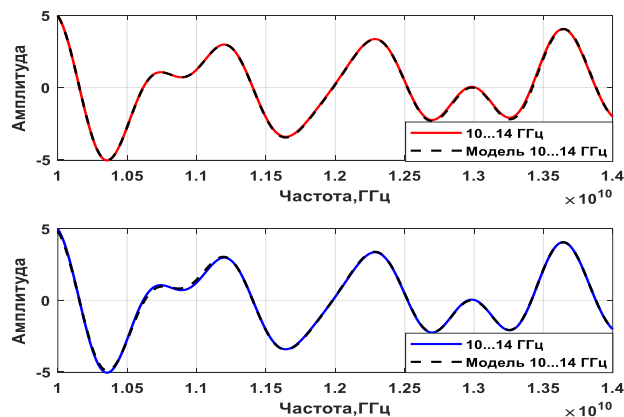


Рис. 6. Экстраполированные модели частотных характеристик в двух диапазонах

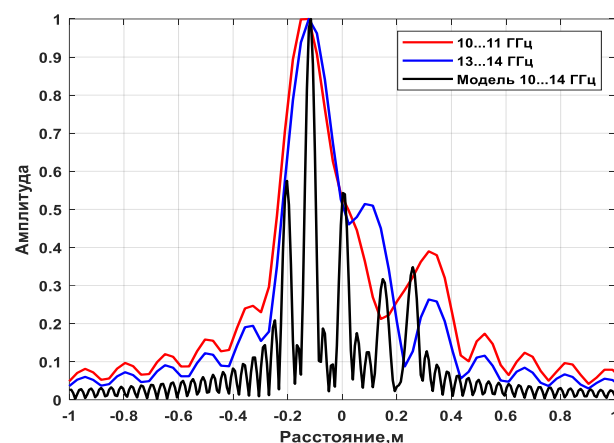


Рис. 7. Дальностные портреты на основе модели экстраполированной, исходной в нижнем диапазоне и исходной в верхнем диапазоне частотных характеристик

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения разработанного алгоритма видно, что удалось значительно повысить разрешающую способность (рис. 7). До применения используемых процедур обработки блестящие точки на наблюдаемом объекте определялись слабо, после обработки – появились явные провалы, которые позволяют определить не только количество этих точек, но и расстояние между ними. До применения обработки ширина полосы была 1 ГГц, после – 4 ГГц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Юнция Ц., Сюньчжан Г., Сян Л., Юнсян Л. Высокоточный метод оценки параметров ГТД, 2015 г.
- [2] Дж.Э. Пиу, К.М. Куомо, Дж.Т. Майхан. Методика обработки когерентных сигналов в пространстве состояний для сверхширокополосной сети, 20 июл. 1999 г.