

Phased Array System Toolbox

Разработка и моделирование систем обработки сигналов на основе фазированных антенных решеток

Phased Array System Toolbox (набор инструментов для проектирования систем ФАР) предоставляет алгоритмы и инструменты для разработки, моделирования и анализа систем обработки сигналов на основе фазированных антенных решеток (ФАР). Эти возможности представлены в виде функций и системных объектов MATLAB. Системный набор инструментов включает алгоритмы генерации сигналов, формирования диаграммы направленности, оценки направления поступившего сигнала, детектирования целей и пространственно-временной адаптивной обработки.

Системный набор инструментов позволяет создавать моностатичные, бистатичные и мультистатичные архитектуры для различных геометрических форм антенных решеток. Данные архитектуры могут располагаться на стационарных или движущихся платформах. Инструменты анализа и визуализации ФАР помогают оценить пространственные, временные и спектральные характеристики. Phased Array System Toolbox предоставляет инструменты для создания полной, законченной модели системы ФАР или же дает возможность использовать отдельные алгоритмы для обработки полученных данных.

Ключевые особенности:

- алгоритмы доступны как функции и системные объекты MATLAB;
- моделирование моностатичных, бистатичных и мультистатичных систем ФАР;
- анализ решеток и 3D-визуализация; физическое моделирование равномерных линейных и прямоугольных решеток, а также произвольных конформных решеток на перемещающейся платформе;
- функции цифрового формирования диаграммы направленности для широкополосного и узкополосного сканирования: максимального правдоподобия (MVDR/Caron), линейно-ограниченных минимальных отклонений (linear constraint minimum variance, LCMV), временных задержек, непереобрабатываемого формирователя луча (Frost) и подполосных фазовых сдвигов;
- алгоритмы адаптивной пространственно-временной обработки, включая смещение фазового центра решетки (DPCA), обращение матрицы отсчетов (sample matrix inversion, SMI) и визуализацию углового доплеровского отклика (angle-Doppler response);
- алгоритмы оценки направления принятого сигнала, куда входят техники MVDR, вращательной инвариантности (ESPRIT), сканирование луча, основной классификации множественных сигналов (root MUSIC) и мгновенный метод равносигнальной зоны (monopulse);
- функции синтеза формы сигнала для импульсной непрерывной волны (pulsed CW), линейной и ступенчатой частотной модуляции, переменной частоты повторения импульсов, а также инструменты визуализации формы сигнала для функции неопределенности и отклика согласованного фильтра;
- алгоритмы для переменного по времени усиления, компрессии импульсов, когерентного и некогерентного интегрирования, обработки уровня ложных тревог (CFAR), построения кривой соотношения правильного и ложного детектирования сигналов (ROC curves) и оценки расстояния и доплеровского сдвига.

Также имеются примеры и демонстрации, которые могут служить отправной точкой для разработки пользовательских систем ФАР.

Разработка и анализ фазированных антенных решеток

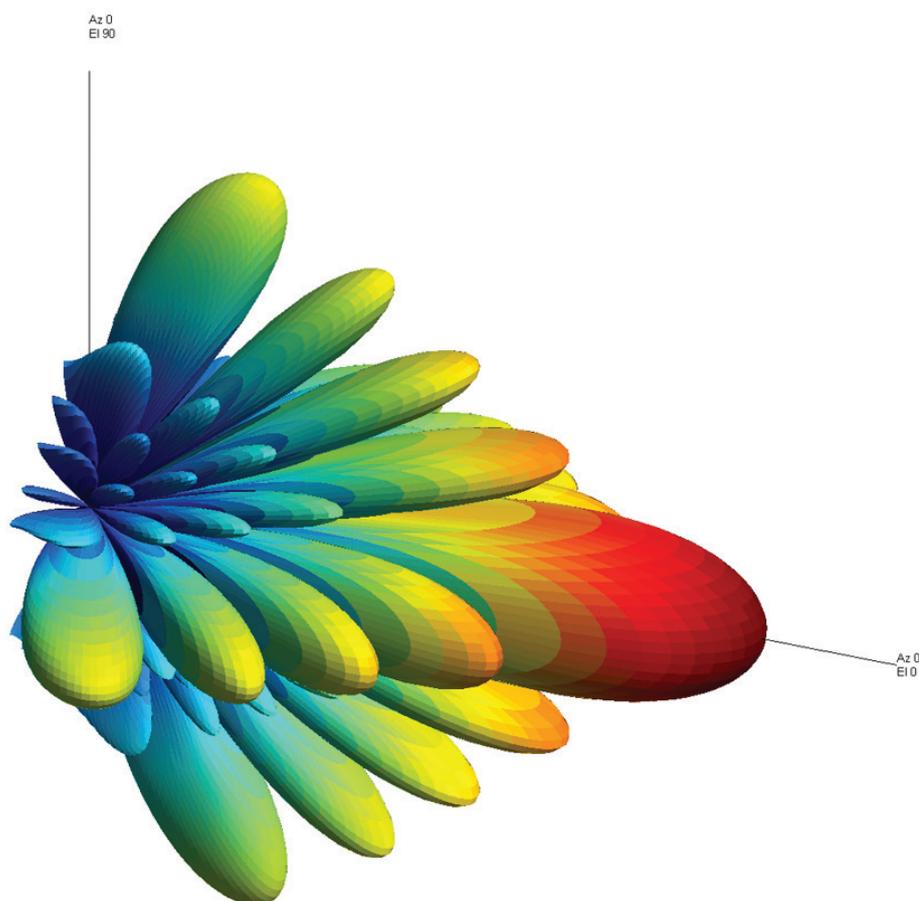
Phased Array System Toolbox предоставляет возможности для моделирования и анализа поведения наиболее распространенных и определенных пользователем геометрий антенных решеток. Сюда входят следующие виды решеток:

- равномерная линейная (ULA);
- равномерная прямоугольная (URA);
- конформная.

Разработчик может задать свою собственную геометрию решетки, указав число элементов и расстояния между ними, а также расположение и ориентацию каждого элемента в 3D-пространстве. Отклик и диаграмма направленности отдельного элемента, как и в случае с решеткой, может быть изотропной, косинусно-затененной или задана пользовательской 3D-моделью, которая может быть описана идеальной аналитической функцией или определена на основе измеренных данных. Затенение (сужение) применимо и ко всему массиву элементов решетки.

Системный набор инструментов предоставляет средства для визуализации и анализа диаграммы направленности отдельных элементов или же всего массива в целом. С этими инструментами можно измерить или вывести на экран:

- усиление решетки;
- отклик решетки;
- задержку между элементами;
- вектор управления лучом;
- отклик элементов.



Трехмерное изображение диаграммы направленности линейной прямоугольной решетки 10×10 .

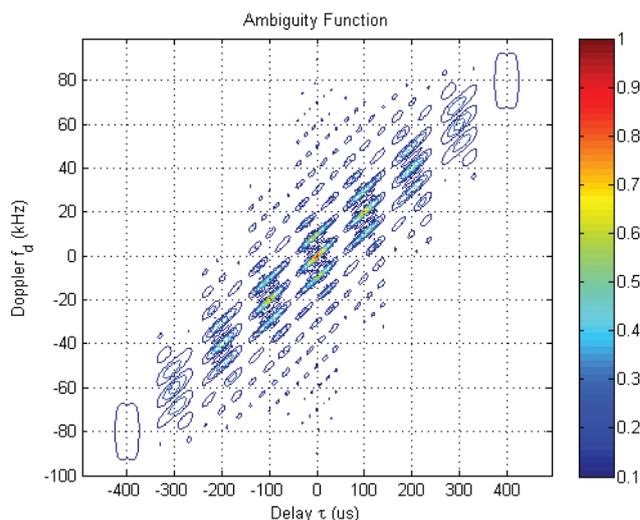
Формирование и анализ сигналов

В Phased Array System Toolbox поддерживается работа (и соответствующий анализ) со многими распространенными формами сигнала, включая:

- постоянную частоту (PCW);
- линейную частотную модуляцию (LFM);
- ступенчатую частотную модуляцию (stepped FM).

Каждый из этих сигналов имеет ряд конфигурируемых параметров, таких как частота повторения импульсов, частота дискретизации, длительность импульса и ширина полосы пропускания. Поддерживается работа с переменной частотой повторения импульсов, что позволяет решить проблему определения скорости цели в подвижных наземных комплексах (ground moving target indicator, GMTI). Поддерживаются ортогональное и взвешенное по Гауссу представление огибающей сигнала.

Кроме того, для визуализации формы сигнала имеются специальные инструменты, такие как функция неопределенности (AF), которая дает представление о характеристиках сигнала в терминах разрешающей способности по дальности, доплеровской частоте и связи между этими параметрами. Также можно рассчитать отклик идеального согласованного фильтра.



Функция неопределенности для LFM-сигнала.

Моделирование передатчика и приемника

Phased Array System Toolbox поддерживает обобщенную структуру для моделирования физической передачи, распространения через среду и окончательного приема сигнала, которая позволяет моделировать моностатические и бистатические системы. В дополнение к этому элементы решетки можно представить как часть движущейся платформы, динамика которой (начальное положение и скорость) определяются пользователем. Элементы передатчика и приемника могут располагаться на общей (моностатический вариант) или на отдельных платформах (бистатический). Геометрия стационарной системы задается нулевым вектором скорости.

Поведение передатчика задается следующими параметрами:

- усиление;
- пиковая мощность;
- коэффициент потерь;
- движение платформы.

Для более полного охвата возможных ситуаций также может быть смоделировано получение сигнала на приемной решетке, поведение которой определяется такими характеристиками, как:

- узкополосная или широкополосная модель;
- ближняя или дальняя зона;
- затенение решетки;
- движение платформы.

После того, как сигнал получен элементами решетки, можно настроить следующие параметры модели приемника:

- усиление;
- коэффициент потерь;
- ширину полосы шума;
- коэффициент шума;
- расчетную температуру.

Также можно настроить модель приемника на когерентную и некогерентную обработку.

Моделирование целей и среды распространения сигнала

Моделирование целей

Цели задаются как точечные отражатели, которые главным образом определяются отношением мощности радиолокационного отражения к мощности сигнала, дошедшего до отражающего объекта (radar cross section, RCS). В Phased Array System Toolbox поддерживаются следующие модели целей:

- без флуктуации (модели Сверлинга 0 и 5);
- с флуктуацией (модели Сверлинга 1–4).

Более сложные цели задаются как массив распределенных точечных отражателей. Также можно моделировать движение целей, определив присущую им динамику через начальное положение и вектор скорости.

Моделирование среды распространения

Системный набор инструментов включает модели распространения сигнала в свободном пространстве, имитирующие односторонние или двусторонние задержки распространения. Отражаются как временные задержки, так и фазовые сдвиги, полученные сигналом во время прохождения через среду. Одностороннее распространение полезно для моделирования бистатичных систем, а двустороннее — для моностатичных. Пользователь может определить собственные более сложные модели, используя алгоритмы **MATLAB**. В качестве альтернативы имеется возможность интеграции своих моделей среды распространения с системными инструментами.

Имеется модель станции активных заградительных помех, генерирующей широкополосный сигнал с заданной пользователем мощностью излучения. Для моделирования более сложного электромагнитного окружения можно использовать несколько таких станций.

Пространственная обработка сигналов

Цифровое формирование диаграммы направленности

Формирование диаграммы направленности является основополагающей операцией пространственной обработки сигнала в системах ФАР. В Phased Array System Toolbox поддерживаются техники одномерного и двумерного формирования луча, а также обычная и адаптивная обработка.

Поддерживается алгоритм Кейпона, ставший стандартным алгоритмом адаптивного формирования диаграммы направленности для борьбы с помехами, а также метод линейно-ограниченных минимальных отклонений для подавления эффекта самозануления. Для широкополосного сигнала имеются алгоритмы, такие как неперестраиваемый формирователь диаграммы направленности (Frost beamformer) и LCMV с задержками. В альтернативу задержкам можно использовать многополосную обработку для широкополосного сигнала.

Поддерживаются следующие техники формирования диаграммы направленности:

- **Узкополосная:** обычная (сдвиг фазы), MVDR (Capon) и LCMV.
- **Широкополосная:** Frost, LCMV с временными задержками и подполосная обработка.

Оценка направления поступления сигнала

Определение направления, с которого поступил сигнал, также является фундаментальной операцией пространственной обработки. В системный набор инструментов входит несколько техник, применяемых для разных геометрий решетчатой решетки.

Равномерная линейная решетка:

- сложение и вычитание моноимпульсов;
- сканирование луча (Beamscan);
- MVDR (Capon);
- техники с высоким разрешением: оценка параметров множественного сигнала с помощью вращения инвариантов (ESPRIT), пространственная ESPRIT, базовой классификации множественного сигнала (root MUSIC), взвешенная подгонка подпространств (weighted subspace fitting).

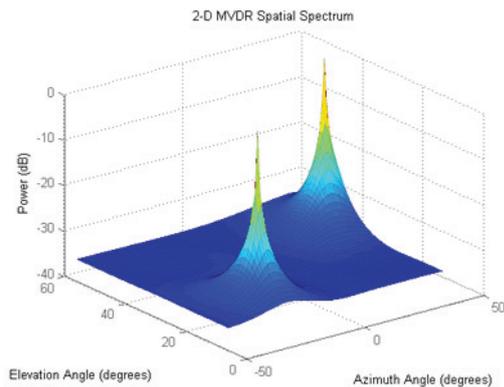
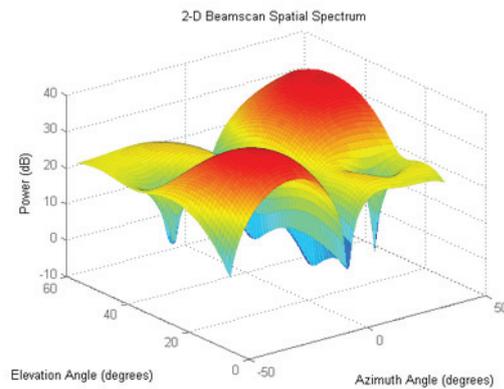
Равномерная прямоугольная решетка:

- сложение и вычитание моноимпульсов;
- сканирование луча;
- MVDR (Capon).

Конформная решетка:

- сканирование луча;
- MVDR (Capon).

Техники оценки направления поступления сигнала с высоким разрешением конфигурируются такими параметрами как информационный критерий Акаике (AIC), критерий минимальной длины описания (MDL) и число рассматриваемых сигналов.



Две нераспознанные цели на 30 и 40 градусов (сверху). Распознавание с помощью техники наибольшего правдоподобия цели (снизу).

Временная обработка сигналов

После того, как сигнал прошел через антенную решетку и интерфейс приемника, с помощью техник временной обработки может быть сгенерирован результирующий куб радара. К этим техникам относятся:

- контроль изменяющегося во времени усиления (TVG);
- компрессия импульсов;
- когерентное и некогерентное накопление сигнала.

На этом этапе обработки применяются алгоритмы детектирования и оценки интересующих параметров, таких как расстояние и доплеровские сдвиги. Данные инструменты позволяют численно оценить и построить графики производительности системы по детектированию целей:

- обработка постоянного уровня ложных тревог;
- визуализация рабочих характеристик приемника;
- определение порога детектирования Пирсона;
- уравнения Альбершейма и Шнидмана (Albersheim and Shnidman).

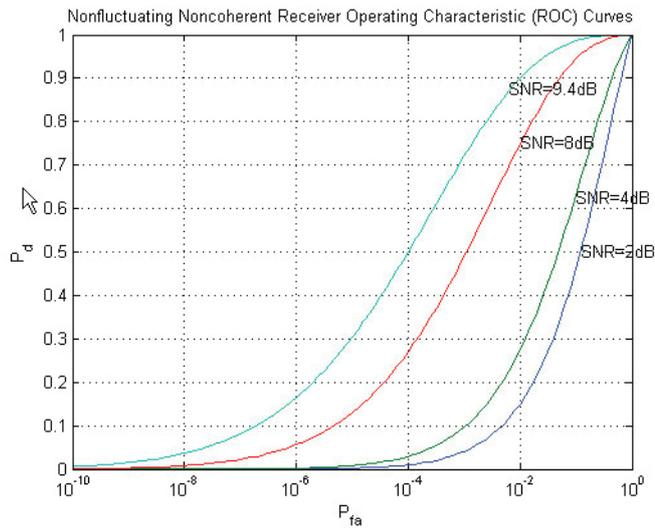


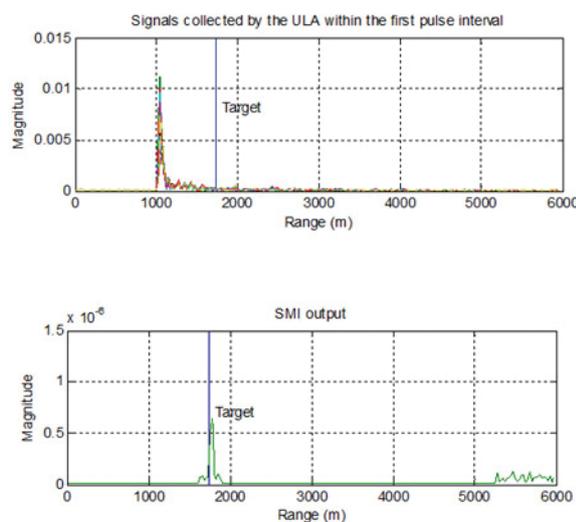
График рабочих характеристик приемника для различных значений отношения сигнал-шум (SNR).

Адаптивная пространственно-временная обработка

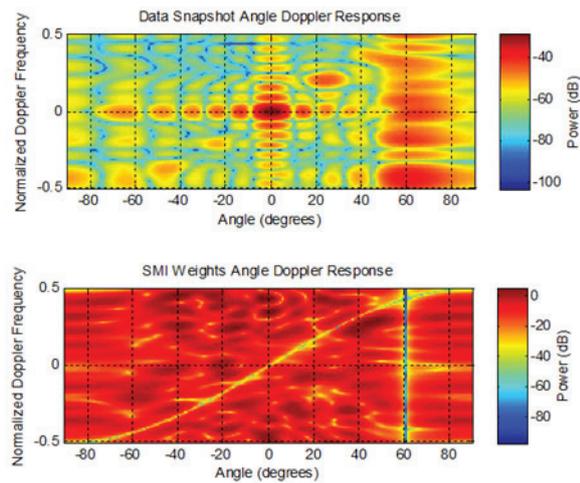
Для подавления шума и активных помех в Phased Array System Toolbox включены несколько алгоритмов пространственно-временной обработки:

- смещение фазового центра решетки;
- адаптивное смещение фазового центра решетки;
- обращение матрицы отсчетов (SMI).

Хотя алгоритм обращения матрицы отсчетов требует интенсивных вычислений и обычно не претендует на реализацию в системах реального времени, он может быть использован в качестве эталона для сравнения с другими техниками. Инструмент для определения углового доплеровского отклика дает возможность оценки общей производительности системы на выходе алгоритмов пространственно-временной обработки.



Цель скрыта заградительной помехой, расположенной на расстоянии 1000 метров (вертикальная синяя линия сверху). После применения алгоритма SMI действие помехи подавляется и цель становится детектируемой (снизу).



Угловой доплеровский отклик комбинированного сигнала от помехи и цели (сверху) и картина детектирования цели после взвешивания по алгоритму SMI (снизу).

Дополнительная информация

Ресурсы

Информация о продуктах, примеры и системные требования
www.sl-matlab.ru/services/products/

Пробная версия
www.sl-matlab.ru/services/request_trial.php

Лицензирование и цены
www.sl-matlab.ru/services/request_price.php

Техническая поддержка
www.sl-matlab.ru/services/service/ssms.php

Сообщество пользователей
matlab.exponenta.ru

Обучение
www.sl-matlab.ru/training

Сторонние продукты и сервисы
www.sl-matlab.ru/services/products/ppartnership.php

Контакты

www.sl-matlab.ru/about

E-mail: matlab@sl-matlab.ru

Тел.: +7 (495) 232-00-23, доб. 0609