

Ковалев А.Е.

Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского
Союза Г.К. Жукова, Тверь, Россия

Курилов А.Р.

Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского
Союза Г.К. Жукова, Тверь, Россия

ММО-РАДАР: ТОНКОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Аннотация. С ростом технологических возможностей и способностей вычислительной техники обрабатывать огромные массивы информации в мире появились радары высокого разрешения на огромные и не совсем большие расстояния, что отвечает вызовам нынешнего времени. Такие радары используются в различных сферах деятельности, в том числе военной, что не мало важно для любого суверенного государства.

Abstract. With the growth of technological capabilities and the ability of computing equipment to process huge amounts of information, high-resolution radars have appeared in the world, covering vast distances, which meets the challenges of the current time. These radars are used in various fields, including military applications, which are crucial for any sovereign state.

Ключевые слова: радиолокация, разрешающая способность, передатчики, приемники, антенны, излучение.

Keywords: radar, resolution, transmitters, receivers, antennas, radiation.

ММО-радар (англ. Multiple Input – Multiple Output, «множественный вход – множественный выход») — это РЛС, имеющая несколько передающих и принимающих антенн. Когда инженеры впервые предложили рассредоточить передающие антенны в пространстве, многие коллеги отнеслись к идее

с недоверием. Интуиция подсказывала: если разнести источники сигнала, когерентность разрушится, и надлежащей интерференционной картины не получится, хотя вышло ровно наоборот.

В классической фазированной решетке простейшие излучатели работают синхронно, только с разным сдвигом по фазе. Это дает управляемый луч, но разрешающая способность такого радара сильно привязана к апертуре: чем шире физическая решетка, тем тоньше луч.

MIMO-радар действует иначе, так как здесь передатчики излучают не одинаковые сигналы с разными задержками, а ортогональные — их можно различить даже тогда, когда они приходят одновременно, что является ключевым моментом, который часто упускают из виду.

Представьте, что вы слушаете оркестр. Обычный радар слышит только общую громкость. А MIMO-радар знает, какую ноту сыграла каждая скрипка в отдельности, даже если все звучат в унисон. Ортогональность сигналов достигается разными способами: временное, частотное или кодовое разделение, где каждый передатчик излучает свой сигнал.

Самое интересное происходит на приеме. Сигнал от каждого передатчика отражается от цели и попадает на все приемные антенны. Математически это означает, что пара «передатчик i — приемник j » формирует отдельный канал наблюдения. Если есть N_{tx} передатчиков и N_{rx} приемников, то получается информация, эквивалентная $N_{tx} \times N_{rx}$ каналам.

Теперь очень интересный момент: при правильной геометрии эти виртуальные каналы соответствуют антеннам, расположенным на позициях, которых физически не существует. То есть решетка из четырех передатчиков и четырех приемников (16 виртуальных каналов) может дать разрешение, как у классической 16-элементной решетки, но при этом физически антенн всего восемь.

Расчет для реального прототипа: при длине волны 3 см и восьми физических элементах удалось достичь углового разрешения, для которого обычной решетке

потребовалось бы 24 элемента. Разница в габаритах — почти метр экономии по фронту.

Но, как и у других радаров, данный имеет свои минусы. ММО не панацея, что означает: ортогональные сигналы неизбежно проигрывают синфазным в энергетике (вместо того, чтобы сложиться когерентно, они «мешают» друг другу). Для ближней локации это не страшно, а вот для дальнего обнаружения целей классическая фазированная решетка все еще вне конкуренции.

Кроме того, цена ортогональности — усложнение приемного тракта. Каждый приемник должен уметь разделять сигналы от всех передатчиков одновременно. Это требует либо высокой вычислительной мощности, либо смекалистых схемных решений.

Когда говорят об ортогональных сигналах, обычно рисуют красивые формулы с нулевыми взаимными корреляциями, но на практике всё иначе. Представьте, что четыре передатчика работают одновременно в одном диапазоне. Их усилители мощности — это очень требовательные устройства. Если два передатчика случайно излучают в противофазе на один и тот же отражатель, в эфире возникнет локальный провал мощности, что называется эффект провала суммы.

В обычной фазированной решетке этим управляют — там всё синхронизировано жёстко. В ММО каждый передатчик излучает вне зависимости от других. Аналог из жизни: четыре человека одновременно говорят в один микрофон, но каждый на своём языке. Микрофон принимает кашу, но если есть четыре независимых диктофона, потом можно разобрать каждого. Так и в ММО — идет жертва мгновенной суммой мощностей ради последующего разделения.

Один интересный факт: кодовое разделение сигналов (например, на основе последовательностей Голда или Касами) работает исправно в теории, но на реальной элементной базе даёт проигрыш в отношении сигнал/шум до 3–6 дБ по сравнению с временным разделением. Происходит это из-за того, что аналоговые тракты имеют конечную линейность, и псевдослучайные

последовательности с большими пик-факторами заставляют усилители работать в нелинейной области. В итоге получаются интермодуляционные искажения, которые находятся в сигнале.

Существует версия: «MIMO даёт виртуальную апертуру в $N_{tx} \times N_{rx}$ раз без увеличения физического размера». Это правда только наполовину, так как:

Получаются виртуальные фазовые центры, расположенные на средних точках между каждой парой «передатчик-приёмник». Если есть два передатчика (разнесённые на 4λ) и два приёмника (разнесённые на 4λ), то виртуальная решётка будет состоять из четырёх элементов с шагом 2λ . Угловое разрешение становится как у решётки с апертурой 6λ (от крайнего левого виртуального до крайнего правого). Но виртуальная решётка неравномерная в общем случае из-за того, что к середине элементы сгущаются, а по краям разрежаются.

Это порождает боковые лепестки странной формы, они не симметричные, как у обычной решётки, а имеют провалы и всплески, которые зависят от геометрии. Предсказать их аналитически трудно, приходится гонять симуляции для каждой конфигурации.

MIMO-радар естественным образом подавляет прицельные помехи. Классическая РЛС с одним лучом уязвима для постановщика активных помех, который излучает прямо на частоте радара. MIMO же формирует не один луч, а множество независимых пространственных каналов. Помеха, приходящая с какого-то направления, будет по-разному влиять на разные пары передатчик-приёмник. Поскольку, зная ортогональную структуру своих сигналов, можно отфильтровать помеху адаптивно — как бы «вырезать» это направление, но без провала чувствительности для других направлений.

На практике это работает как пространственный шумодав. Цель не просто видна, но ещё и понятно, откуда идёт засветка, и есть возможность её подавить, не теряя цели, если она не находится точно в том же направлении.

Для фазированной решётки такая манипуляция требует отдельной системы компенсации.

Ни одна конфигурация MIMO не даёт идеального покрытия. Сингулярные ракурсы — направления, в которых матрица виртуальных каналов вырождается. Для простейшей линейной конфигурации с равномерным шагом это направления, где разность хода между соседними виртуальными элементами кратна $\lambda/2$. В этих направлениях два разных угла дают одинаковую интерференционную картину, и радар не может их различить.

Историческая справка: года три назад на конференции в Гамбурге показывали любопытный прототип: 12 передатчиков, 16 приёмников — 192 виртуальных канала на плате размером с ладонь. Ключевая особенность: передатчики работают не одновременно, а по временной схеме с перекрытием. Они разбиты на три группы по четыре, группы излучают последовательно, но внутри группы — одновременно с кодовым разделением. Это компромисс: потеря в скорости обновления, зато пиковая мощность не расплывается, и дальность остаётся приличной.

Их главная проблема оказалась не в математике, а в развязке между приёмниками. Когда 16 приёмников расположены на 5 см, их собственные излучения (обратные связи, переотражения от корпуса) создают ложные цели на дальностях 10–20 метров. Убрали экранами — упала чувствительность, убрали программной фильтрацией — потеряли слабые цели. В итоге сделали специальную печатную плату с вырезами и дополнительными заземлёнными дорожками между каналами.

Есть задачи, где MIMO не просто не помогает, а вредит. Первое — сверхдальняя радиолокация (тысячи километров). Там каждый децибел на счету, и терять 3–6 дБ на ортогональность — непозволительная роскошь. Второе — радиолокация сквозь плотные среды (георадары для грунта). Затухание в среде огромное, и выигрыш в разрешении не компенсирует потерю в проникающей способности. Третье — обнаружение целей с нулевой радиальной скоростью (например, вертолёт в режиме висения). Классический радар с когерентным накоплением работает с ними хорошо. В MIMO из-за ортогональности сигналов

когерентное накопление во времени усложняется, и такие цели могут потеряться в шуме.

ММО-радар — это не магия и не панацея. Это инструмент с чёткими границами применимости. Он даёт невероятное угловое разрешение за счёт трёх недостатков: дальности (потери на ортогональности), скорости обновления (нужно набрать статистику по всем каналам) и вычислительной сложности (обработка матрицы $N_{tx} \times N_{rx}$ в реальном времени).

Но там, где эти недостатки нивелированы — в автомобильных радарх, в дронах для облёта препятствий, в охранных радарх периметра, — ММО не просто лучше классики, он переопределяет саму задачу. Видна структура пространства, а не просто отметка о наличии цели. И вот это переход от «обнаружил» к «увидел» — пожалуй, главная эволюция в радиолокации за последние двадцать лет.

Компромиссом между недостатками и достоинствами данной РЛС являются гибридные схемы, где часть передатчиков работают синфазно, а часть — ортогонально, уже появляются в лабораторных прототипах.

Главное, что стоит вынести: пространство в ММО-радаре — это не просто пустота, где распространяются волны. Это активный ресурс, который можно «перепаковать» в разрешающую способность. И чем изобретательнее инженеры придумывают ортогональные сигналы, тем больше углового разрешения они выжимают из тех же физических габаритов.

Список литературы

1. Рабинер Л., Голд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978. — 848 с.
2. Скотников В.В., Кривошеев А.В. Радиолокационные системы с многоантенными решетками: принципы построения и обработка сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2019. — № 3. — С. 24–39.

3. Петров А.С., Михайлов А.И. Влияние нелинейности усилительных трактов на эффективность кодового разделения сигналов в ММО-радарх
// Радиотехника и электроника. — 2021. — Т. 66, № 7. — С. 682–690.