

Трёхкоординатная локация методом непрерывного излучения

А.В. Крамаренко

*Ошибка выявится только после завершения
окончательной проверки прибора.*

Закон Клипштейна

В основе большинства современных радиолокационных систем используется принцип «концентрации энергии в луче» в наиболее общем варианте сформулированный Акселем Бергом. Человек с фонарём в попытке увидеть и удержать в луче ночную бабочку делает именно это. Дальность обнаружения цели будет тем больше, чем мощнее лампа в фонаре и чем лучше рефлектор, а сопровождение цели будет обусловлено умением пользоваться фонарём. Но вокруг по-прежнему темно и необходимо использовать другие фонари для ориентации в обстановке. Лучей становится всё больше, а фонари разнообразны, специализированы, сложны, дороги и требуют квалифицированных операторов. Полной ориентации в зоне осмотра не получается, т.е. нельзя для любой точки пространства в любой произвольный момент времени получить ответ: цель здесь есть или нет, её скорость, тип и т.д. И явно не хватает фонаря, который равномерно освещает территорию. Разумеется, это утверждение в первую очередь справедливо для обнаружения малозаметных целей.

Однако на самой заре радиолокации Павлом Ощепковым была предложена идея развития систем непрерывного излучения с перспективным требованием: «одно измерение – один кадр». В начале его работы (1934г.!) были получены официально подтвержденные обнаружения цельнодеревянного самолета на дальности 70 (!) километров при 200 Вт мощности передатчика. Поразительно, но уже в первом приборе была устранена «накачка» шумов гетеродина с помощью разноса передающего и приёмного узлов. Затем, после такого успеха, в лучших традициях отечественной нелепости, выдающегося инженера посадили в тюрьму, и десять лет были потеряны. Сам он к радиолокационной тематике более не возвращался и показал замечательные достижения в других областях науки.

Я позволю себе расширить его авторское требование: «одно измерение – один кадр» с учётом мощности современных вычислителей. Мысль Ощепкова можно переформулировать так: для всех (NB!) вокселей контролируемой полусферы значение радиолокационной яркости должно обновляться с любой желаемой частотой.

На первый взгляд это запредельные требования, вытекающие из достаточно сумасшедшей идеи. Единственным оправданием может быть только успешная реализация проекта.

К счастью, такой проект существует «в металле» и великолепно работает уже десятилетия.

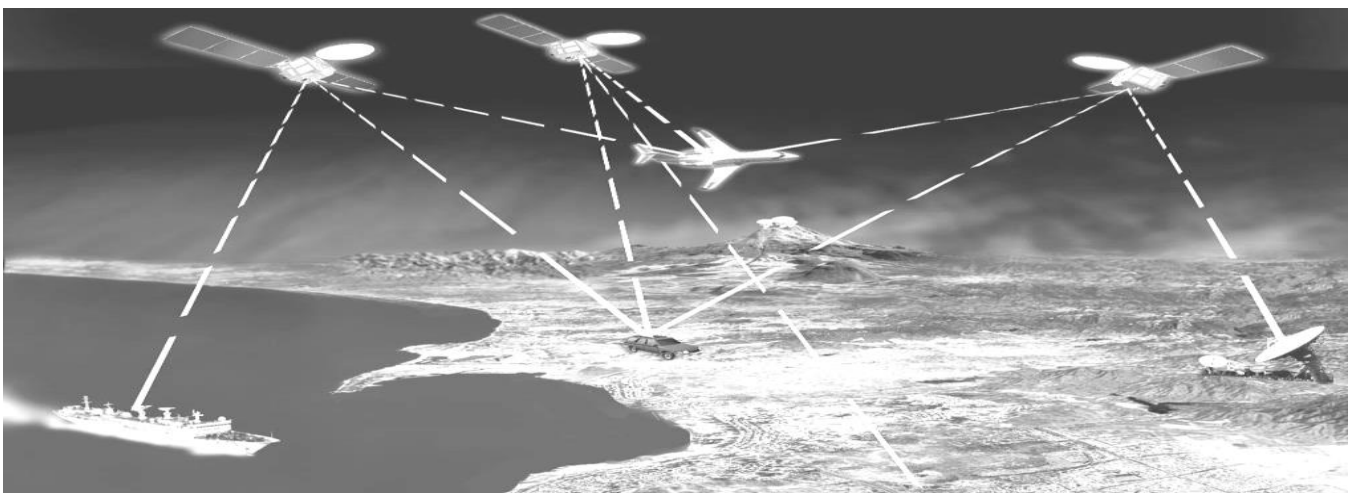


Рис. 1. Иллюстрация работы систем глобального позиционирования (рисунок с сайта radionavi.ru)

Разумеется, речь идёт о глобальных навигационных системах, которые определяют местоположение приёмника, а передатчики находятся в известных координатах. Приёмник может получить свои координаты в любой точке контролируемого пространства в любой момент времени. Если «инвертировать систему», т.е. заменить передатчики приёмниками и наоборот, можно непрерывно получать координаты движущегося передатчика. Остаётся совсем немного: заменить сигнал передатчика сигналом, отражённым от цели. И именно здесь начинаются проблемы...

Итак, пусть есть, по меньшей мере, один передатчик в центре района, контролируемого системой. Он излучает короткие импульсы с периодом следования, скажем, 1 мсек. Используется всенаправленная антенна с «прижатием» излучения к поверхности, её коэффициент усиления в таком случае не будет выше 4-5 дБ. Приёмники (объединённые в сеть) принимают сигнал от передатчика и сигнал, отражённый от цели. После амплитудного детектора оцифрованный сигнал сохраняется в памяти. Координаты и высоты местоположения приёмников и передатчика известны с точностью, определяемой системой глобального позиционирования.

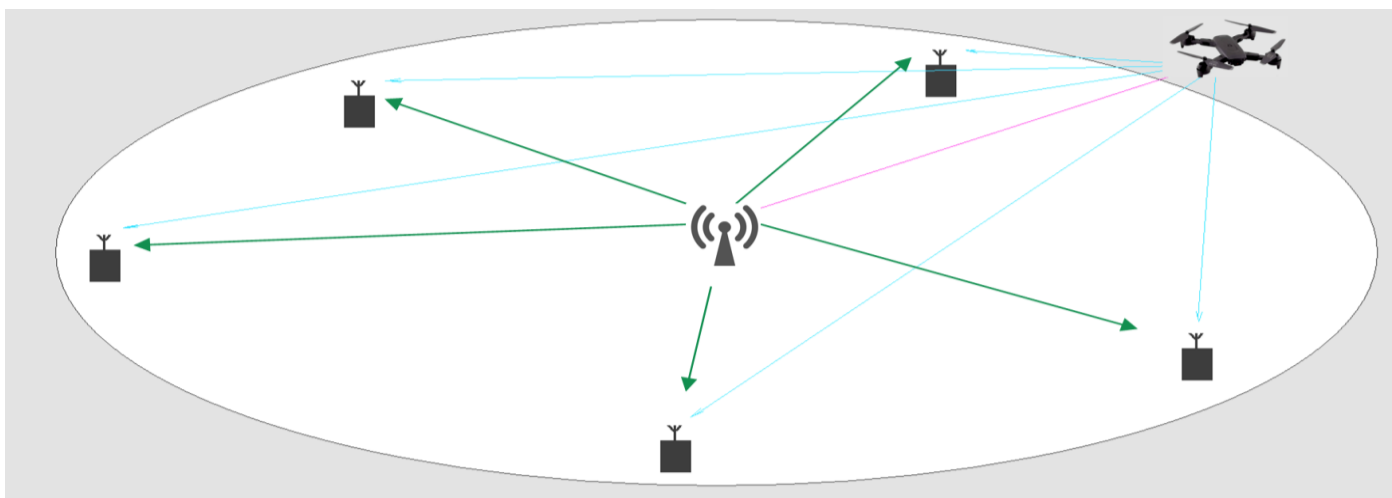


Рис.2. Расположение приёмников и передатчика в контролируемой зоне. Цель вверху справа. Для каждого приёмника есть треугольник (красный, зелёный, синий) путей распространения радиочастотного сигнала. Т.е. принимается как прямой сигнал от передатчика (зелёный), так и сигнал, отражённый от цели (красный – синий).

Обратим внимание: импульс сигнала от цели в этой схеме не может быть принят раньше импульса передатчика. Таким образом, момент приёма сигнала передатчика становится маркером, от которого можно отсчитывать время и, соответственно, найти расстояние по «красно-синему» пути («зелёный» путь известен по определению).

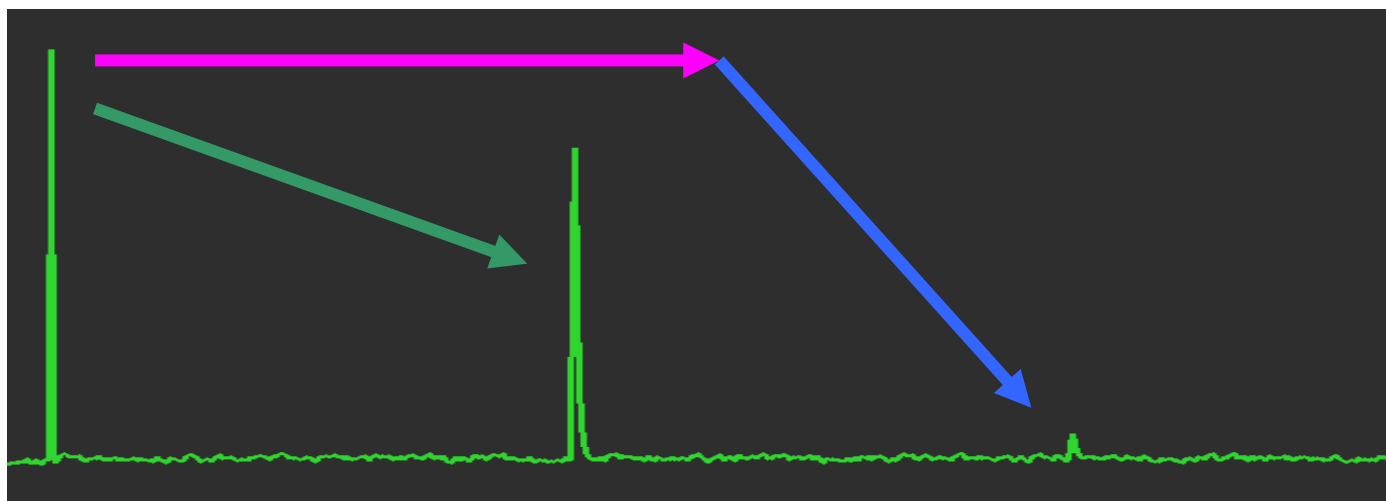


Рис.3. Ожидаемая осциллограмма процесса локации (модель): момент излучения – слева, в центре момент приёма сигнала передатчика, справа – отражение от цели. Цвета стрелок соответствуют рис. 2.

Для построения поверхности тела вращения (т.е. всех возможных «красно-синих» траекторий) достаточно применить простейшую формулу вычисления радиуса тела вращения (в отличие от систем глобального позиционирования, которые оперируют поверхностями сфер). Обозначим радиус поперечного среза как H , расстояние между приёмником и передатчиком как a , дальности до цели как b и c . Тогда:

$$H(a) = 2 \cdot \frac{\sqrt{P \cdot (P-a) \cdot (P-b) \cdot (P-c)}}{a} \quad \text{где} \quad P = \frac{(a+b+c)}{2}$$

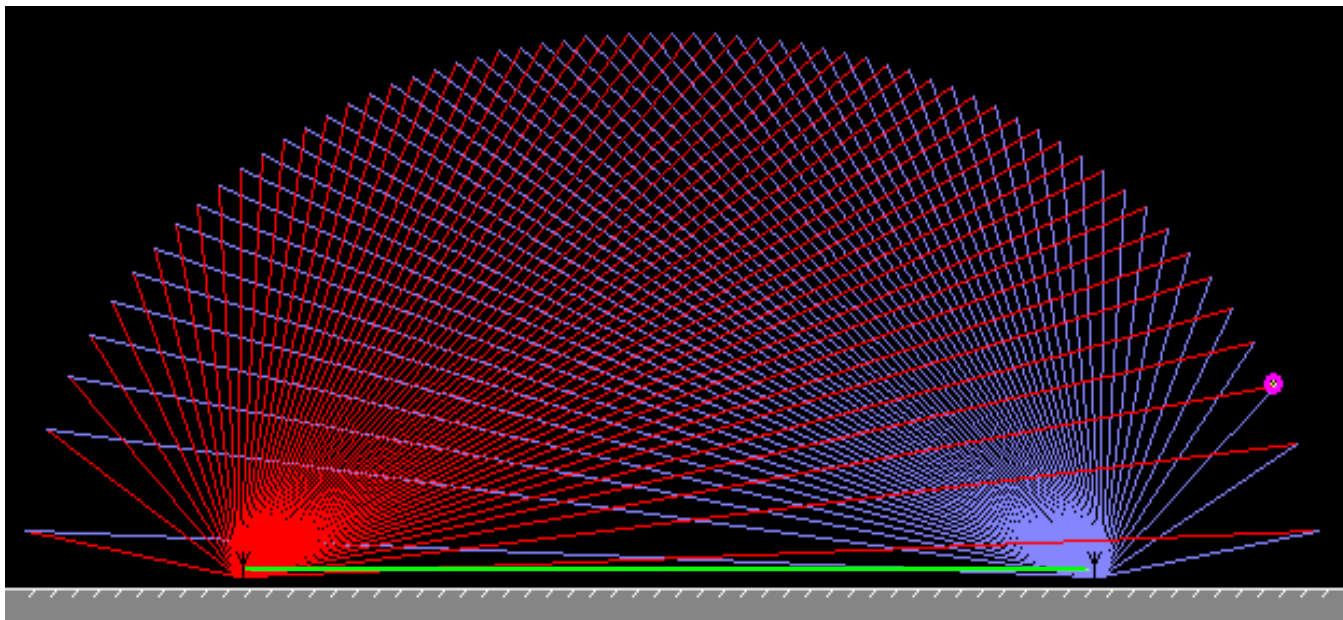


Рис.4. Тело вращения для эквидистантных путей (продольный срез). Слева передатчик, справа приёмник, справа посередине цель, зелёной линией показана прямая связь приёмных и передающих узлов.

Очевидно, что цель всегда находится на поверхности «своего» тела вращения. У всех приёмников эти тела вращения разные. И единственная точка пересечения всех поверхностей будет давать точные координаты цели (разумеется, здесь полное соответствие алгоритмам GPS).

Естественно, каждому положению цели в координатах широта-долгота-высота (или азимут, дальность, угол места) соответствуют временные задержки (для каждого приёмника свои), которые можно представить в виде пересчётной таблицы, т.е. вычислить всего один раз при пуске системы. Поэтому анализ контролируемого пространства становится малозатратной в вычислительном плане операцией, которую можно выполнять в реальном времени.

Действительно, для каждого вокселя с координатами x, y, z нужно всего лишь обратиться к $M(x, y, z)$ ячейке памяти приёмника 1, приёмника 2 и т.д. Затем взвешенная сумма уровней сигналов преобразуется в значение радиолокационной яркости. После обработки всех вокселей будет готово трёхмерное изображение, обновляемое не чаще периода следования импульсов передатчика.

Однако, несмотря на принципиальное сходство с идеологией GPS, эта система «не жилец» и не может хорошо работать по двум причинам. Первая: исключительно малый коэффициент усиления антенны и, как следствие, необходимость очень большой импульсной мощности передатчика. Вторая и главная: подстилающая поверхность будет давать поглощения/отражения намного более мощные, чем сигнал от цели. Кроме того, многократные переотражения и многолучевое распространение сигнала будут обеспечивать постоянный фон разнообразных ложных сигналов. Цель с малой ЭПР просто не будет видна на их фоне. Кроме того: «если сигналы существуют одновременно и их спектры перекрываются, то полное разделение сигналов невозможно» - это базовое положение теории информации отменить никак нельзя. Необходимо найти какое-то решение, позволяющее минимизировать вклад разнообразных нежелательных

эффектов, т.е. нужно выделять полезный сигнал на фоне переотражений, не прибегая к когерентному накоплению. Иначе «закон Клипштейна» проявит себя.

Очевидно, в нашем случае для разделения смеси сигналов необходимо, чтобы излучаемый сигнал имел некоторые изменяющиеся во времени параметры (пилот-сигнал). Т.е. в самом сигнале передатчика должна быть дополнительная информация о том, как давно излучён данный фрагмент сигнала, и эта информация должна находиться в частотной (NB!) области, т.е. должен быть сигнал с неперекрывающимися спектрами. Такое решение позволит обеспечить необходимое разделение во временной области. Но импульсный режим работы локатора для решения задачи не подходит; необходимо будет заполнить сигналом всё время работы передатчика. Предвидя широко распространённое и беспелляционное возражение о невозможности дальней локации непрерывным излучением, приведём простое сравнение.

Пусть есть обзорный радар мощностью 1 МВт в импульсе длительностью 1 мксек, частотой импульсов 1 кГц и направленной антенной, обеспечивающей круговой обзор за 1 сек, т.е. 1000 импульсов за один оборот антенны. Тогда энергия, полученная целью за одну секунду, будет равна энергии, полученной от радара постоянного излучения мощностью 1 кВт с антенной круговой диаграммы направленности. Выигрыш импульсного радара будет обеспечен исключительно за счёт коэффициента усиления антенны, работающей на приём (т.к. отражающая поверхность цели работает как ненаправленная антенна). Но не будем забывать о потребной полосе пропускания приёмника: в первом случае это 1 МГц, во втором – 1 Гц. Т.е. в данном случае до величины коэффициента усиления антенны 60 дБ формальный выигрыш будет за системами непрерывного излучения (вследствие лучшего отношения сигнал/шум на выходе приёмника). Существенный проигрыш может быть только за счёт «накачки гетеродина» и отражений от земли, что и происходит в реальности (если нет пространственного разнеса приёмного и передающего узлов).

Предложим паллиативное (на первый взгляд) решение: пусть передатчик излучает последовательность ортогональных частот в каждом такте работы. Тогда режим излучения становится непрерывным, а последовательность частотных посылок пусть повторяется с постоянным периодом. Соответственно решается вопрос с импульсной мощностью, т.к. дальность обнаружения целей всегда зависит от средней мощности передатчика.

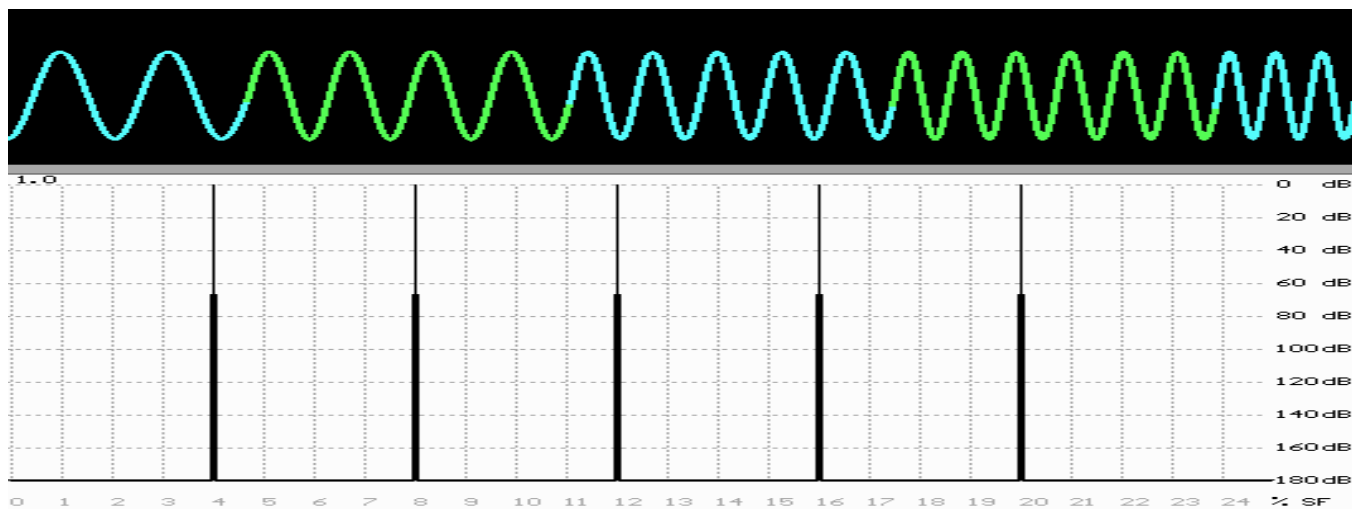


Рис.5. Последовательность посылок ортогональных частот и её спектр при полной синхронизации окон данных во временной области.

Будем считать, что для этого сигнала в условиях разделения его фрагментов во времени перекрытие спектров исключается. Основная задача остаётся прежней: для любого вокселя с координатами x, y, z нужно постоянно знать радиолокационную яркость, которая теперь будет определяться энергией основного спектрального лепестка. Временная задержка для этого вокселя известна изначально. Следовательно, мы всегда знаем, какова частота сигнала, отражающегося от цели, которая возможно находится в данном месте, в данный момент времени.

Итак: энергия, соответствующая яркости воксела, поступает на вход приёмника постоянно. Приёмник принимает полезный сигнал, и этот сигнал имеет задержку t_1 , которая совпадает с той, которая известна геометрически. Т.е в данный промежуток времени принимаем сигнал на частоте f_1 (она соответствует текущей задержке), затем на частотах $f_2, f_3...f_n$, и цикл повторяется. Разумеется, сигнал принимается постоянно на всех частотах, а вот выбор частоты для анализируемого воксела определяется расчётной задержкой. Естественно, массив данных для вокселов становится двумерным: первый параметр – величина задержки, второй – частота, на который принимается этот сигнал.

В процессе работы на входе приёмника постоянно существует множество отражённых и рассеянных сигналов, имеющих задержки, отличающиеся от задержки полезного сигнала. Однако вследствие особенностей модуляции, частоты этих сигналов всегда ортогональны частоте полезного сигнала.

Убедимся в корректности алгоритма и ещё раз проверим пересекающиеся полусферы. Есть полусфера, заполненная излучением передатчика. По ней от центра к поверхности распространяется сигнал с дискретно меняющейся частотой. Есть также виртуальная полусфера приёмника, где радиальные дальности однозначно связаны с задержками, а каждой задержке соответствует частота, на которой принимается сигнал.

Базовая геометрическая теорема гласит: «линия пересечения поверхностей двух сфер есть окружность». Для полусфер от окружности остаётся только дуга. Заметим, что для всех вокселов, находящихся в этой дуге, сигнал будет идентичным, а разрешение в пределах дуги появится только при сопоставлении с данными других приёмников: обратим внимание, здесь полное соответствие с GPS алгоритмом.

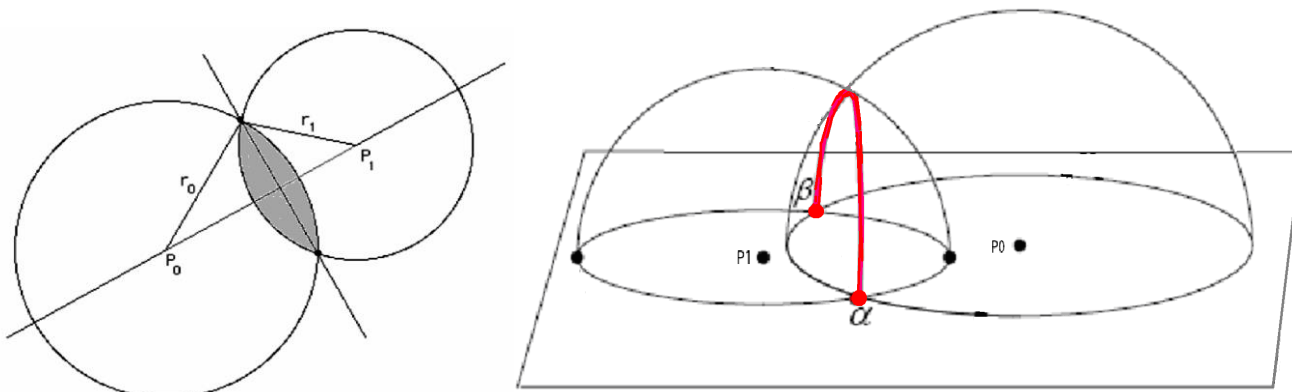


Рис.5. Условия совпадения радиусов выполняются только для дуги, обозначенной красным цветом.

Очевидно, отражения от других целей и от подстилающей поверхности, за исключением части дуги «своего» эллипса, где она касается земли (точки « α » и « β » на рисунке), должны быть подавлены на величину разрешения частотного анализатора. Проверим это утверждение экспериментально: пусть помеха превышает полезный сигнал на 150 дБ.

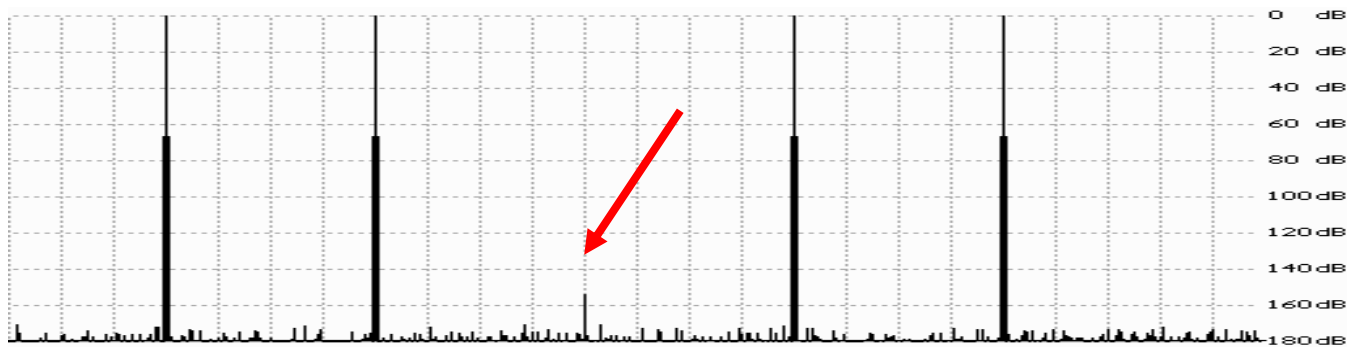


Рис.6. Сигнал (модель) на выходе спектроанализатора при помехе 0 дБ на всех ортогональных частотах, полезном сигнале -150 дБ на частоте F_3 (показан стрелкой) и АБГШ -170 дБ. Окно данных анализатора собственное. Результат соответствует ожиданиям.

Выходной сигнал для всех приёмников, т.е. взвешенная суммарная яркость воксела формируется так же, как было описано выше, а весовая функция может быть самой разнообразной для текущей задачи - от медианной фильтрации до любых вероятностных критериев.

Разумеется, яркостный сигнал получается квантованным во времени с частотой, обусловленной периодом смены рабочих частот, т.е. достаточно высокой для последующего распознавания цели по амплитудной модуляции сигнала (ТВД – по биениям, вертолёт - напрямую). При наличии возможностей установить на приёмники по две антенны с ортогональной поляризацией для каждого воксела можно будет получать суммарный и разностный амплитудный сигнал (не в смысле полномасштабного вектора Джонса, а как дополнительный параметр). Тогда манёвры цели с изменением крена и тангажа можно будет отслеживать непрерывно. Распознавание целей также улучшится.

Необходимо отметить, что проектирование такой системы будет непростым делом. Например, доплеровские сдвиги целей с ненулевой радиальной скоростью придётся компенсировать расширением основного лепестка спектроанализатора соответствующим окном (вероятно окнами Гаусса или Наттолла). Кроме того выбранные размеры воксела, т.е. требуемое разрешение по азимуту, дальности и углу места, будут детерминировать формат сигнала передатчика, как по длительности посылок, так и по количеству используемых ортогональных частот. Более того, вероятно, придётся решать непростую математическую задачу выбора кода и шифра частотного набора для минимизации просачивания многолучевых распространений от подстилающей поверхности и преднамеренных помех. Впрочем, успехи в развитии OFDM для систем связи в последнее десятилетие позволяют выразить сдержанный оптимизм.

Несмотря на очевидную трудоёмкость разработки, такая система будет иметь определённый выигрыш по сравнению с существующими трёхкоординатными РЛС.

1. Вследствие мультистатической компоновки будет всегда верно определяться истинное значение ЭПР цели. Т.о. любые методы дезинформации о величине ЭПР теряют смысл: ни технология малозаметности, ни линзы Люнеберга, ни даже активные системы SAS в ЛЦ типа MALD не смогут исказить истинное значение поверхности рассеяния цели (т.к. невозможно «обслуживать помехой» приёмники, расположенные неизвестно где).

2. Учитывая отсутствие необходимости формирования острого луча, рабочий диапазон частот может быть любым. В основном выбор будет определяться минимальным переотражением от подстилающей поверхности.

3. Селекция движущихся целей может стать двухуровневой: фильтрация кривой яркости воксела БИХ ФНЧ при согласовании частоты среза со спектром АМ помех от ветровых эффектов растительности на местности (это первый и основной этап) будет иметь несомненные преимущества перед имеющимися способами. Например, сверхширокополосная немодулированная по амплитуде шумовая помеха будет скомпенсирована за несколько секунд.

4. Вследствие компактности и низкого энергопотребления приёмных блоков они могут быть размещены на БПЛА, что резко улучшит как характеристики по дальности, так и по обнаружению низколетящих целей со сверхмалой ЭПР. В данном случае есть хорошая перспектива для будущих боёв БПЛА друг с другом. Кроме того, вся система, включая передатчик, сможет перемещаться во время работы (разумеется, только при условии постоянного обновления географических координат каждого элемента).

5. В случае размещения одного из приёмных блоков на самом перехватчике может быть обеспечен его «бесшумный» выход к цели до радиуса работы АРЛГСН, а до этого момента СПО цели никак не сможет обнаружить сопровождение.

6. Постановка активных помех противником будет затруднена, т.к. их придётся вести неприцельно; в свою очередь применение ППРЧ в сигнале передатчика дополнительно осложнит работу ПАП. Самоприкрытие целей будет затруднено необходимостью взлома кода и шифра, в противном случае потребуется нереальная мощность помехопостановщика.

7. Применение противником противорадиолокационных ракет сможет вывести из строя передатчик (который много дешевле ракеты) только на короткое время, в течение которого включится резервный модуль, и аппаратура восстановит работоспособность. В этом случае отсутствие сложной и дорогой антенны передатчика с остронаправленной ДНА повышает живучесть системы.

8. Обнаружение приёмников будет нетривиальной задачей, и даже уничтожение некоторых из них приведёт только к небольшому падению разрешения, но система сохранит работоспособность. Отметим, что невысокая стоимость приёмников позволит использовать их в большом количестве (повышая чувствительность и разрешение системы).

9. Для гражданского применения можно предполагать, что вряд ли диспетчер аэропорта откажется от трёхмерной картинки, которая методом первичной(!) локации позволит видеть все самолёты в реальном времени. В свою очередь, приёмник такой системы на гражданском лайнере сделает излишними курсоглиссадные системы и приводные маяки.

10. Предлагаемый алгоритм локации пригоден также для сонаров и ультразвуковых систем интроскопии, работать он, несомненно, будет, но здесь компетенция автора устремляется к нулю.

11. Недостатки: Большая трудоёмкость разработки и необходимость значительного объёма экспериментальных работ. Кроме того разрешение системы имеет имманентную зависимость от точности позиционирования приёмных и передающих антенн, т.е. при включении в работу будут необходимы данные дифференциальной GPS.