

## Доплеровская радиоголография

Блок СДЦ (селекции движущихся целей) есть на каждом радиолокаторе. Он работает на основе эффекта Доплера, когда движение объекта изменяет частоту отраженной волны по отношению к частоте передатчика. Почти всегда устройства СДЦ выполняются на фазовом детекторе, в котором опорное напряжение от передатчика перемножается с напряжением от принимаемого сигнала. Принцип работы детектора можно объяснить тригонометрическим равенством:

$$\cos((\omega + \Omega)t) \cdot \cos(\omega t) = 0.5 \cdot (\cos((2\omega + \Omega)t) + \cos(\Omega t))$$

Здесь  $\omega$  - частота радиоволны,  $\Omega$  - доплеровское смещение.

Высокочастотная компонента отфильтровывается, на выходе фазового детектора появится напряжение  $U$ , зависящее от доплеровской частоты как

$$U = \cos(\Omega t)$$

Для неподвижных объектов напряжение на выходе детектора не меняется, для подвижных его значения начинают осциллировать с доплеровской частотой, что является признаком движущейся цели.

Самый простой способ индикации цели, вычесть показания фазового детектора в соседние моменты времени. Но здесь может возникнуть проблема, которая называется «слепыми скоростями», когда фаза между соседними

измерениями изменится на  $2\pi$  и осцилляции не будут фиксироваться, что сделает движущийся объект «невидимым». Для борьбы со слепыми скоростями на радиолокаторах обычно используют «вобуляцию частоты повторения» зондирующих импульсов, когда вводят неравномерное расстояние по времени между соседними измерениями.

Селекция движущихся целей может очень сильно подавлять сигналы от неподвижных объектов, пропуская сигналы от движущихся.

Коротковолновый загоризонтный радиолокатор, работающий отраженной от ионосферы волной на расстояние 3000 км, способен фиксировать корабли, самолеты, крылатые ракеты с помощью СДЦ вне зависимости от высоты полета последних, поскольку радиоволна падает на них сверху. Система устойчиво работает, хотя площадь отражения от неподвижной поверхности земли существенно выше, чем от подвижной цели.

Есть еще одно интересное применение СДЦ на загоризонтном радиолокаторе. Такие локаторы дают возможность измерять направление и силу ветра на удалении до 3000 км от места его расположения, наблюдая за морской поверхностью. Связано это с тем, что морская волна для системы СДЦ подвижна и дает сильное отражение за счет брэгговской дифракции. Скорость ветра, длина и высота морской волны связаны между собой, и измеряя доплеровский спектр отраженных сигналов в зависимости от частоты передатчика, можно решить задачу измерения силы и направления ветра.

Поскольку в голографическом радаре для фиксации голограмм используется фазовый детектор - это готовая к применению система СДЦ. Если вычесть из одной голограммы другую, снятую через некоторый промежуток времени, а потом по их разности построить изображение, станут видимыми только движущиеся объекты, все неподвижные отражатели будут подавлены. Этот простейший способ алгоритмической обработки обеспечивает высокую чувствительность и большой динамический диапазон прибора, что переводит его в разряд интроскопов, и чего не удалось сделать исследователям в 70-е годы.

Это поняли в начале 21 века. Сейчас спецслужбы США и Израиля имеют голографические радары, позволяющие следить через стену за перемещением людей.

Мы также провели измерения по доплеровской радиоголографии, результаты которой приводятся ниже.

На рис. 36 показано место проведения измерений. На фотографии видны дверные косяки, электропроводка, металлические петли и стулья, участвующие в формировании доплеровского изображения косвенно, через переотражения радиоволн от движущегося человека. Шлакоблочная стена толщиной 20 см, через которую проводились доплеровские измерения, находится слева и на фотографии не видна. Рупор передатчика и антенная решетка приемника были придвинуты вплотную к стене на высоте 1.5 м. Использовалась вертикальная поляризация.

На рис. 37 - 47 показаны примеры изображения движущегося человека. Среднее расстояние от стены до человека составляло 2.5 метра. За время между последовательными съемками человек ростом 176 см. перемещался примерно на 1 -2 см. На таком расстоянии радар с апертурой 40X40 см. при длине волны 3 см имеет угловое разрешение 0.075 рад, что определяет линейное разрешение по высоте и ширине около 20 см, и что следует учитывать при оценке качества изображения.

На рис. 37 - 41 представлено продольное перемещение человека от стены, через которую проводилась регистрация, на рис. 42 - 47 - поперечное движение справа налево.

Изображение имеет спекл – пятнистость, связанную с когерентностью радиоволны и ее интерференцией. Частично спекл можно устранить путем усреднения изображений. На некоторых изображениях видны неподвижные предметы – дверные косяки и электропроводка. Это не прямые отражения радиоволн от передатчика, а их переотражения от движущегося человека, поэтому они также имеют доплеровское смещение.

На изображении движущегося человека (особенно при поперечном перемещении рис. 42 - 47) наблюдаются периодические «выбегания» и «уширения» отдельных участков его тела в ту либо другую сторону. Это объясняется рефракцией в неоднородной для радиоволны стене, через которую проводилась доплеровская съемка. Аналог этому в оптическом диапазоне - наблюдение за человеком через оплывшее стекло.

В подтверждение этому приведем на рис. 48 радиоголографическое изображение того участка стены, через который проводились доплеровские измерения.

Съемка стены производилась с расстояния 47 см кроссполяризационным методом, чтобы подавить зеркальное отражение (блик) от стены. Приведена фронтальная проекция изображения, полученного методом Кирхгофа с окном Хэмминга, где наблюдается неоднородная структура шлакоблочной стены.

Объемное голографическое изображение можно получить для объекта, если он находится (для нашего случая) не далее 2 м от приемной решетки. При увеличении расстояния волна приближается к плоской, и «сфокусировать» ее при обработке становится уже физически невозможным. Радар теряет способность определять глубину и становится «двумерным», способным фиксировать изображения только в двух угломестных координатах, по вертикали и горизонтали. Однако сама дальность обнаружения объектов может быть существенно больше 2 м.

Если голографический радар работает на одной частоте, то определить расстояние до человека можно только по его угловому размеру, опираясь на факт, что рост человека варьируется не очень сильно.

Возможность радара работать на ряде частот позволяет измерять расстояние до объекта на любых расстояниях.

Изображение объекта имеет фазу, которая связана с дальностью, но ее периодичность в воздухе равна длине волны  $\lambda$ , что исключает возможность использовать одночастотное излучение для определения величины дальности. Но здесь можно использовать измерения на двух близких частотах.

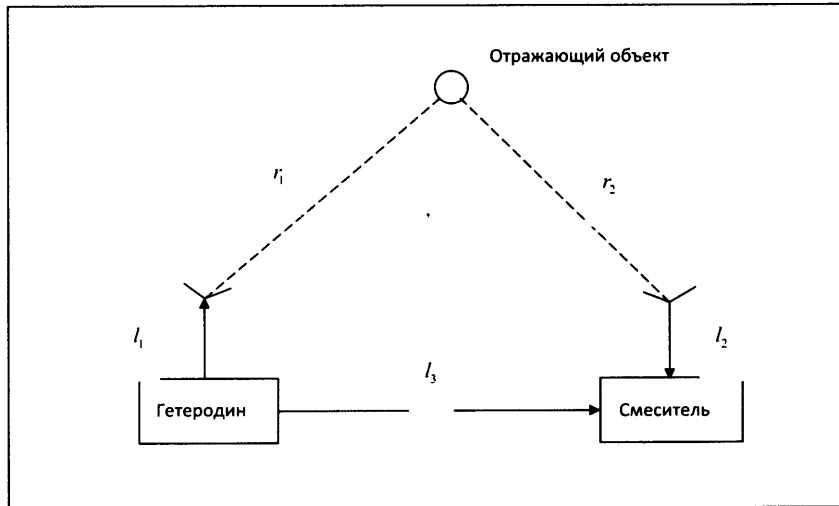


Рис. 49. Схема фазовых измерений дальности.

Фаза  $\psi$  отраженного от объекта сигнала после смесителя (фазового детектора, рис. 49) определяется как:

$$\psi = \frac{2\pi f}{c} [n(l_1 + l_2 - l_3) + r_1 + r_2] \quad (6)$$

Здесь:  $c$  - скорость света,  $f$  - частота радиоволны,  $l_1, l_2, l_3$  - длина соединяющих гетеродин, антенны и смеситель кабелей,  $n$  - коэффициент фазового замедления в кабеле.

Разность фаз сигнала на двух частота будет иметь вид:

$$\psi_1 - \psi_2 = \frac{2\pi(f_1 - f_2)}{c} [n(l_1 + l_2 - l_3) + r_1 + r_2] \quad (7)$$

В случае, когда  $l_1 + l_2 - l_3 = 0$  или  $k(l_1 + l_2 - l_3) \ll r_1 + r_2$ , а расстояния до объекта между передатчиком и приемником примерно одинаковы ( $r_1 \approx r_2 = r$ ), дальность определяется формулой:

$$r = \frac{c(\psi_1 - \psi_2)}{4\pi(f_1 - f_2)} \quad (8)$$

Фаза  $\psi$  является периодической функцией расстояния с периодом  $2\pi$ , поэтому зона однозначности будет составлять:

$$r_p = \frac{c}{2(f_1 - f_2)} \quad (9)$$