

Разрешающая способность измерительных приборов

М. ЛИВШИЦ

ВСЕМ ИЗВЕСТНО, ЧТО МИКРОСКОП НУЖЕН ДЛЯ ТОГО, например, чтобы пересчитать число микробов на предметном столике, телескоп – чтобы пересчитать звезды на небе, радиолокатор – чтобы установить число летательных аппаратов в небе и расстояния до них.

В этой статье речь пойдет о важнейшем свойстве физических приборов – их разрешающей способности, т.е. величине наименьших деталей объектов измерения, различаемых в процессе измерения. Именно разрешающая способность является главной характеристикой качества применяемого измерителя (даже более важной, чем точность измерений). Например, не только от увеличения микроскопа зависит его качество. Если устройство микроскопа не обеспечивает раздельное восприятие достаточно мелких деталей объекта, то получаемое изображение не улучшится даже при значительном росте увеличения. Мы получим только более крупную, но такую же нечеткую картинку рассматриваемого предмета. Кроме того, сами ошибки измерения могут быть определены только после разрешения, т.е. после выделения данной детали объекта из других.

Покажем, какие физические свойства дистанционных (неконтактных) измерителей непосредственно влияют на получающееся при их использовании разрешение и какими методами можно добиться улучшения разрешающей способности таких приборов.

Сначала дадим количественную оценку. Чем более мелкие детали объектов могут быть выделены данным прибором в процессе измерения, тем лучше (выше) его разрешающая способность. Для различных приборов существуют различные определения и разные формулы для количественной оценки разрешающей способности в зависимости от целей и методов: например, оценивается ли разрешение деталей предмета (микроскоп, бинокль, телескоп) или отдельных линий в спектре излучения (призма, дифракционная решетка и другие спектральные устройства), используется ли независимость наблюдения и измерения координат нескольких целей (радиолокатор, гидролокатор, эхолот животного) и т.п. Однако общепринятой основой количественной оценки разрешающей способности является критерий Рэлея, первоначально установленный для случая раздельного наблюдения двух точечных источников света (разрешение двойных звезд). Его обобщение, позволяющее использовать этот критерий в самых разных случаях, осуществляется следующим образом.

Пусть входное воздействие на измерительный прибор состоит из двух пиков, отстоящих на интервал Δx ; при этом

на выходе прибора от каждого пика получается «отклик» в виде более размазанного по x всплеска конечной ширины, характеризующий свойства прибора и называемый аппаратной функцией (рис.1).

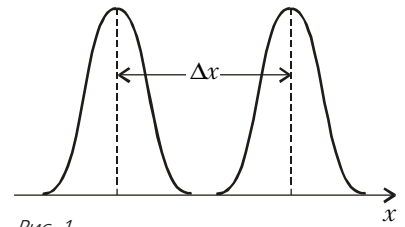


Рис. 1

Тогда разрешающей способностью по Рэлею называют минимальный интервал Δx_{\min} между воздействиями двух пиков, при котором суммарный отклик еще имеет вид

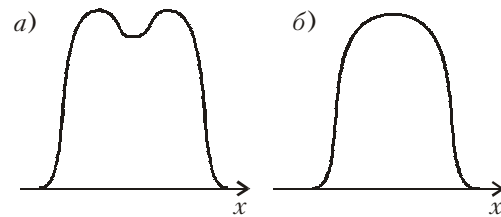


Рис. 2

двугорбой кривой (рис.2,а). Если уменьшить Δx , верхушка суммарного всплеска уплощается и всплески сливаются в один (рис.2,б).

Какие же параметры волн, используемых в дистанционных измерителях, определяют величину разрешающей способности? Оказывается, таким параметром является степень когерентности волн (латинское слово «когерентный» означает «находящийся в связи»).

Прежде вспомним о когерентности колебаний. Колебания называются когерентными, если разности фаз и отношения амплитуд колебаний остаются постоянными в течение всего времени наблюдения. В простейшем случае когерентными являются два синусоидальных колебания $A \cos(\omega t + \alpha)$ и $B \cos(\omega t + \beta)$, где A , B , α и β – постоянные величины. Поскольку волновые процессы определяются колебаниями во всех точках пространства, где эти волны существуют, необходимым условием когерентности волн является когерентность колебаний, происходящих в каждой данной точке волны в течение времени наблюдения.

Более общим и кратким является определение некогерентности волн: пучки света или других волн будут некогерентными, если разность фаз между колебаниями во всех точках пространства, где эти волны существуют совместно, многократно и нерегулярным образом изменяется в течение времени наблюдения.

Теперь постараемся установить связь разрешающей способности измерителя со степенью когерентности волн. Наиболее наглядно это можно сделать на примере радиолокации – способе определения местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Кратко напомним принцип работы импульсной радиолокационной станции (РЛС). На рисунке 3 изображена блок-схема РЛС. Здесь 1 – передатчик, 2 – антенный переключатель, 3 – антенна, 4 – диаграмма направленности антенны, 5 – приемник, 6 – индикатор. Передатчик РЛС с помощью узконаправленной антенны производит периодическое облучение пространства кратковременными цугами радиоволн (так

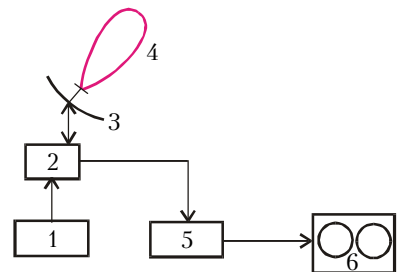


Рис. 3

называемыми зондирующими, т.е. «ощупывающими», импульсами). Поворотом антенны (или другими способами) производится изменение направления излучения радиоволн и, тем самым, осуществляется последовательное зондирование большего или меньшего сектора пространства (или круговой обзор). Отраженные от различных целей импульсы поступают (обычно через ту же антенну) в приемник РЛС. При этом определение угловых координат целей основано на использовании диаграммы направленности антенны на излучение и прием. Измерение дальности D производится по измерению времени запаздывания $t_{\text{зап}}$ прихода отраженного от цели импульса относительно момента излучения зондирующего импульса:

$$D = \frac{ct_{\text{зап}}}{2},$$

где c – скорость света. Двойка в знаменателе появляется из-за того, что время запаздывания складывается из времени прохождения зондирующего импульса до цели и такого же времени прохождения отраженного импульса до РЛС.

Разрешающей способностью РЛС по углу называется наименьшая разность углов $\Delta\alpha$ между направлениями на две цели, находящиеся на одной дальности, при которой отраженные импульсы от них наблюдаются раздельно. Легко видеть, что это соответствует простейшему пространственной некогерентности: разрешаются (по углу) те цели, на которые не может одновременно попасть «освещающее» излучение РЛС, так как направления на них отличаются на ширину диаграммы направленности антенны (рис.4).

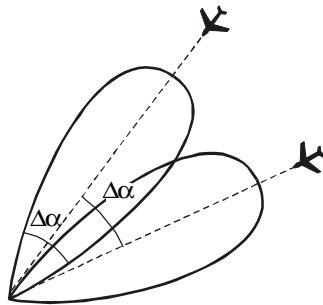


Рис. 4

находящимися в одном направлении, при котором они наблюдаются раздельно. В так называемых классических РЛС в качестве зондирующего импульса применялся синусоидальный цуг волн постоянной амплитуды. Это объясняется, в частности, тем, что такой цуг легко создать: достаточно на высокочастотный генератор (например, магнетрон) кратковременно подать постоянное по величине высокое напряжение. Однородность структуры цуга приводит к тому, что отраженные от различных целей волны будут иметь одинаковую частоту (если они движутся по направлению к РЛС с одинаковой скоростью или если можно пренебречь эффектом Доплера), в пределах взаимного перекрытия отраженных импульсов они будут когерентны, и разделить цели полностью не удастся. Отраженные от двух целей импульсы

будут некогерентны только тогда, когда они не совпадают по времени прихода в приемник РЛС и поэтому не перекрываются на экране индикатора (рис.5). Таким образом, разрешающая способность этих РЛС по дальности составляет

$$\delta r = \frac{c\tau}{2},$$

где τ – длительность импульса. Можно сказать, что

в рассматриваемой РЛС некогерентность приходящих от разных целей отраженных сигналов выступает в самом простом виде: как отсутствие их совпадения во времени.

Как видно из последней формулы, для повышения разрешающей способности по дальности необходимо уменьшать длительность импульса τ . Но это неизбежно приводит к соответствующему расширению полосы частот. Дело в том, что, с одной стороны, существует фундаментальное соотношение между длительностью τ сигнала (например, обрывка синусоиды) и шириной $\Delta\nu$ его спектра (на шкале частот), в которой сосредоточена основная энергия импульса:

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{\tau}.$$

С другой стороны, вполне понятно, что дальность обнаружения цели определяется энергией зондирующего и, следовательно, вернувшегося назад импульса. Значит, при укорочении импульса приходится соответственно увеличивать мощность передатчика, что является непростой задачей.

В поисках выхода из этой ситуации в радиолокации пошли по пути увеличения ширины полосы частот импульса без изменения его длительности: путем перехода от синусоидальной к более усложненной внутренней структуре зондирующего импульса. Так появились РЛС с линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) зондирующими импульсами (рис.6). В этом случае оказывается, что соотношение между длительностью и шириной сигнала будет выполняться уже не для длительности импульса $\tau_{\text{имп}}$, а для времени когерентности $\tau_{\text{ког}}$:

$$\tau_{\text{ког}} \approx \frac{1}{\Delta\nu} \left(\text{где } \Delta\nu \gg \frac{1}{\tau_{\text{имп}}} \right).$$

Правда для этого в приемнике РЛС вводится дополнительный специальный фильтр, с помощью которого осуществляется сжатие принятого импульса до длительности $\tau_{\text{сж}} = \tau_{\text{ког}}$. Теперь импульсы на экране РЛС будут разделяться при гораздо меньшем расстоянии между целями, чем это было при использовании синусоидального импульса:

$$\delta r = \frac{c\tau_{\text{сж}}}{2} \ll \frac{c\tau_{\text{имп}}}{2}.$$

Так подтверждается неразрывная связь разрешающей способности дистанционного измерителя со степенью когерентности волн: для повышения (улучшения) разрешающей способности измерителя необходимо ухудшать когерентность используемых волн.

Любопытно отметить, что в живой природе развитие в этом направлении пошло еще дальше. Например, наряду с летучими мышами, эхолокаторы которых также используют ЛЧМ зондирующие импульсы, существуют так называемые «шепчущие» летучие мыши, применяющие еще более широкополосные шумовые импульсы, т.е. высокочастотные импульсы, модулированные «белым» шумом. Они обнаруживают цели при значительно меньших мощностях излучения, при этом обеспечивается также лучшая защита их локаторов от помех, особенно от взаимных, возникающих при одновременной охоте на насекомых больших групп этих летучих мышей.

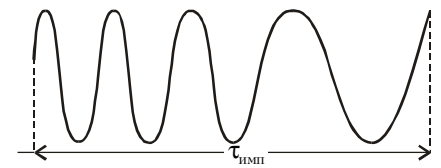


Рис. 6

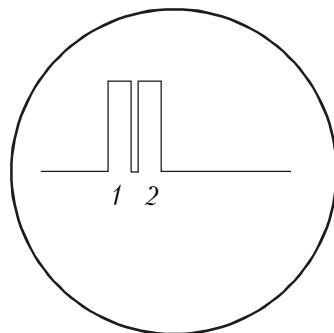


Рис. 5