

В. М. КАРТАШОВ, канд. техн. наук

## АНАЛИЗ И ВЫБОР ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При проектировании радиоакустической станции разработчик прежде всего оказывается перед необходимостью выбора видов зондирующих колебаний, обеспечивающих возможность решения поставленной задачи по измерению параметров атмосферы имеющимися или наиболее простыми средствами. Другим, альтернативным методом нахождения сигналов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, является их синтез.

Критерием качества векторных сигналов, синтезируемых с использованием методов, рассмотренных в [1], выступает функция рассеяния [2]. Вид желаемой функции рассеяния выбирается исходя из имеющегося опыта решения теоретических и практических задач в данной области, понимания особенностей функционирования радиоакустических систем, знаний в области теории сигналов. Чем полнее понимание, богаче опыт и глубже знания, тем лучше, по-видимому, удастся формализовать и воплотить в функции рассеяния требования к аппаратуре, особенности систем данного вида, замыслы и стремления разработчика. При таком подходе, естественно, остается значительный простор для интуиции исследователя и инженера.

Как известно, причиной специфических ошибок измерения температуры атмосферы системами радиоакустического зондирования (РАЗ) является дополнительное смещение центральной частоты спектра рассеянного радиосигнала по сравнению с чисто доплеровским смещением, которое наблюдается при изменяющихся по трассе метеоусловиях, вследствие частотной избирательности акустического волнового пакета. Данный вид погрешностей уменьшается по мере приближения значений модуля функции рассеяния

$$F(r, q) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_E\left(\frac{k}{2}\right) S_S^*(k+q) e^{-j\frac{r}{2}k} dk \quad (1)$$

при  $r = 0$  к равномерной в некотором диапазоне значений  $q$  функции. Здесь  $S_E$  – спектр комплексной огибающей радиосигнала  $E$ ;  $S_S$  – спектр комплексной огибающей акустического сигнала  $S$ ;  $k$  – пространственная частота;  $q$  – параметр расстройки условия Брэгга;  $r$  смещение сигналов по продольной пространственной координате (по дальности).

Будем считать, что электромагнитное излучение является непрерывным и монохроматическим, имеющим спектр  $S_E(k/2) = 4\pi\delta(0)$ . Как видно из последнего равенства,  $\delta$ -функция здесь имеет размерность пространственной частоты. Тогда выражение (1) при  $r = 0$  будет иметь вид

$$F(0, q) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(0) S_S^*(k+q) dk. \quad (2)$$

На основании фильтрующего свойства  $\delta$ -функции запишем

$$F(0, q) = S_S^*(q). \quad (3)$$

Будем полагать функцию рассеяния действительной, равномерной на интервале  $(-q_1, q_1)$  и равной единице. Применяя преобразование Фурье к (3), получим форму синтезируемого акустического сигнала – его комплексную огибающую

$$S(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(0, q) e^{jqr} dq = A \frac{\sin(q_1 r)}{q_1 r}, \quad (4)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала ( $A = 2q_1$ ).

Данный вид сигнала, как видно, относится к классу фазоманипулированных с изменением фазы на  $\pi$  в точках, где действительная огибающая обращается в нуль. Спектральная плотность такого сигнала равномерна в диапазоне пространственных частот  $(-q_1, q_1)$ .

Акустический сигнал с равномерной спектральной плотностью в заданной полосе пространственных частот  $\Delta k$  можно рассматривать как «заместитель» точечной радиолокационной цели в указанной полосе: спектральная плотность последней является равномерной на интервале от  $-\infty$  до  $\infty$ , а сама точечная цель одинаково успешно отражает падающие на нее электромагнитные волны независимо от их частоты, не изменяя при рассеянии формы спектральной плотности колебаний. Это вызывает некоторые аналогии с аппроксимацией спектральной плотности шума, действующего в полосе пропускания приемника, равномерной функцией в этом диапазоне частот для того, чтобы считать действующий шум белым. Отсюда становятся очевидными сходства математических моделей точечной цели и белого шума.

Синтезированный сигнал, как и синтезированное оптимальное устройство [3], далее целесообразно проанализировать с позиций обеспечения требуемых показателей качества и возможностей его практической реализации.

Практическим недостатком полученного акустического сигнала является наличие длинных «хвостов», отстоящих от основного лепестка. Однако, как показывают результаты моделирования, достаточно плоская форма пространственного спектра получается даже в том случае, если ограничиться только одним боковым лепестком сигнальной функции или его половиной.

Тело рассеяния  $Z(r, q) = |F(r, q)|$  акустического сигнала, имеющего комплексную огибающую вида  $\sin(r)/r$ , и простого радиоимпульса конечной длительности с прямоугольной огибающей представлено на рис. 1. Интересная особенность данного тела – одинаковая форма сечений вдоль осей  $r$  и  $q$  объясняется тем, что корреляционные интегралы в пространственной и частотной областях включают одинаковые наборы функций, составляющих пары сигнал-сигнал и спектр-спектр, которые взаимопреобразуются в результате преобразования Фурье.

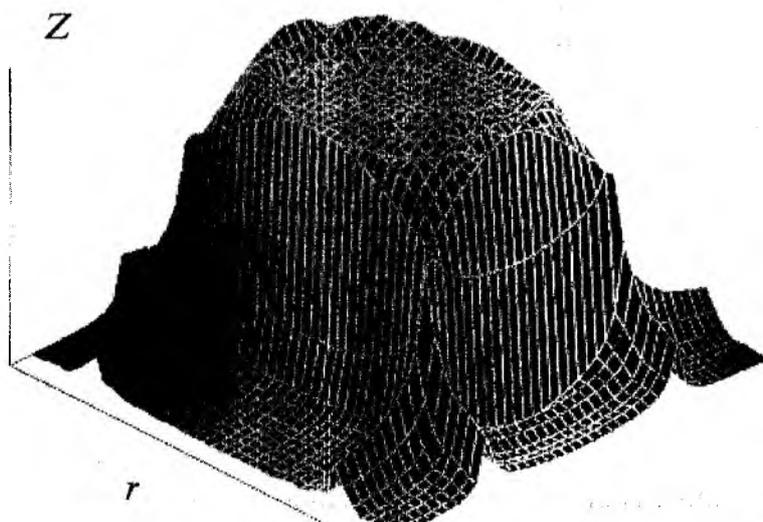


Рис. 1

Для сравнения на рис. 2 приведено тело рассеяния, образованное сигналами, единственным отличием которых от рассмотренного выше векторного колебания является отсутствие в акустическом сигнале фазовой манипуляции.

Как следует из рис. 2, отказ от фазовой манипуляции приводит к «похудению, выпячиванию позвоночника и формированию впалых боков» тела, а следовательно, к существенному ухудшению возможностей системы по защите от изменяющихся в процессе зондирования метеорологических условий.

Использование радиоакустического сигнала с «платообразным» телом рассеяния (рис. 1), напротив, позволит устранить или существенно уменьшить характерную для систем РАЗ погрешность оценивания температуры, порождаемую изменчивостью метеопараметров.

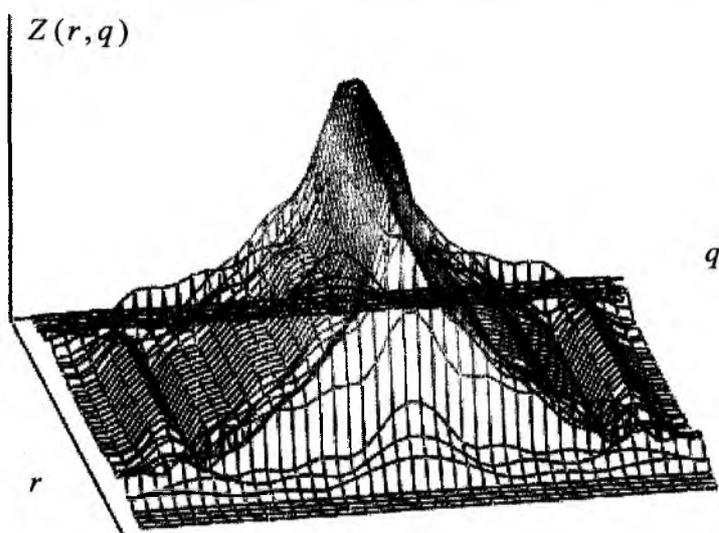


Рис. 2

Задача выбора зондирующих сигналов для радиоакустических систем имеет общие черты как с соответствующей задачей радиолокационных систем, так и систем связи. С последней задачей ее объединяет необходимость выбора ансамбля из двух сигналов — акустического и электромагнитного, также характеризующегося требуемыми взаимокорреляционными свойствами.

Характеристики проектируемой радиоакустической системы определяются обеими составляющими векторного радиоакустического сигнала. При этом на практике выбор следует производить отдельно каждого из сигналов, принимая во внимание особенности рассматриваемых скалярных колебаний и их «ответственность» за определенные участки тела рассеяния, а также учитывая совместные свойства предполагаемой пары, известные из результатов теоретических исследований и натурных экспериментов.

От вида и параметров акустического сигнала в значительной степени зависят следующие характеристики проектируемой системы: диапазон исследуемых дальностей, пространственная разрешающая способность и оперативность измерений, точность оценивания метеопараметров. Использование импульсных звуковых сигналов обеспечивает достаточно простое выделение пространственной области, из которой приходит отраженный радиосигнал, а пространственная протяженность акустического пакета в направлении зондирования определяет пространственное разрешение в этом направлении. Оно может быть легко изменено соответствующим изменением длительности излучаемого акустического импульса. Кроме того, получение информации из спектра отраженного радиосигнала возможно только при использовании одиночного акустического волнового пакета. При излучении непрерывных звуковых колебаний или последовательности импульсов информация о состоянии атмосферы содержится только в амплитуде рассеянного радиосигнала, зависящей от степени выполнения условия Брэгга, а спектр его оказывается сдвинутым на значение частоты звука.

Импульсные звуковые сигналы, используемые в расдарах, могут быть простыми или сложными. Уменьшение длительности простого акустического импульса расширяет его пространственный спектр и улучшает разрешающую способность (по дальности), но ухудшает энергетические показатели системы. Увеличение длительности импульса, напротив, сужает диапазон волновых чисел рассеяния и ухудшает разрешающую способность измерений, но улучшает энергетические показатели системы. В этом состоит характерное для простых акустических сигналов противоречие между дальностью действия системы, с одной стороны, и диапазоном дальностей и разрешающей способностью, с другой. Имея единственный независимый параметр – длительность, они не способны обеспечить требуемое распределение объекта рассеяния по координатам «дальность -пространственная частота».

Поэтому при использовании простых акустических сигналов требуется подстройка частоты под условие Брэгга. Подстройка может осуществляться «быстро» путем изменения частоты электромагнитного сигнала по мере продвижения звукового импульса в атмосфере, или «медленно» – путем изменения частоты акустического сигнала для достижения соотношения Брэгга в некоторой точке пространства или небольшом диапазоне высот. Диапазон значений параметра  $q$ , в котором амплитуда рассеянного сигнала не уменьшается ниже заданного порога, может быть определен точно по телу рассеяния либо приближенно по формуле

$$\Delta q = \pi/c_s \tau_s, \quad (5)$$

где  $c_s$  – скорость звука;  $\tau_s$  – длительность акустического импульса.

Использование сложных акустических сигналов позволяет расширить диапазон пространственных частот, а следовательно, диапазон метеорологических условий, в которых амплитуда рассеянного сигнала находится в заданных пределах. Наиболее исследованным в теоретическом и практическом отношении является линейно- частотно- модулированный (ЛЧМ) звуковой пакет, для которого диапазон возможных расстройек определяется соотношением

$$\Delta q = \frac{2\pi}{c_s} \Delta f, \quad (6)$$

где  $\Delta f$  – девиация частоты.

С целью уменьшения пульсаций пространственного спектра и повышения точности измерений целесообразно использовать «предыскажение» структуры сигнала в виде специальной колебательной добавки в закон частотной модуляции. Возможно также использование составного импульса, состоящего из совокупности субимпульсов с различными частотами, являющегося дискретным аналогом линейно – частотно модулированного сигнала.

При использовании ЛЧМ- акустического импульса и измерении дальности до него необходимо принимать во внимание наличие специфической систематической ошибки дальности, свойственной ЛЧМ- сигналу.

Сложный акустический сигнал с фазокодовой манипуляцией (ФКМ) также характеризуется расширенными (по сравнению с простыми импульсами) пространственным спектром и диапазоном значений  $q$ , в котором система зондирования сохраняет работоспособность. Однако тело рассеяния получается в этом случае изрезанным, пикоподобным. Наличие значительных по уровню боковых пиков в теле рассеяния может привести к «перепутыванию» одного из них с основным пиком в условиях достаточно малого отношения сигнал-шум или значительной величины флуктуационной составляющей в рассеянном сигнале, что сопровождается появлением аномальных ошибок при оценивании информативных параметров – частоты или времени запаздывания.

Для ФКМ- звуковых сигналов также справедливо выражение (5), но под  $\tau_s$  здесь следует понимать длительность одного элементарного импульса, входящего в кодированную последовательность. Расчет параметров простых, ЛЧМ- и ФКМ- импульсов для заданных метеоусловий, интегрально выражаемых через величину  $\Delta q$ , следует осуществлять в соответствии с выражениями (5), (6).

Возможно использование других видов «псевдошумовых» звуковых сигналов с целью инвариантной защиты систем РАЗ от изменяющихся метеорологических условий, однако, как правило, все они (как и ЛЧМ- и ФКМ- импульсы) характеризуются неравномерной спектральной плотностью в рабочем диапазоне значений  $q$ , что приводит к искажению спектральной плотности рассеянного радиосигнала и появлению специфической погрешности оценивания температуры.

Использование акустического сигнала с комплексной огибающей вида  $\sin(r)/r$  и фазовой манипуляцией обеспечивает формирование равномерного в некотором диапазоне значений параметра  $q$  сечения тела рассеяния  $Z(0, q)$ . Акустический волновой пакет в указанном диапазоне значений  $q$  отражает как частотно-независимый рассеивающий объект (как точечная цель), не изменяя при рассеянии формы спектральной плотности падающего радиосигнала. Вследствие этого он позволяет устранить характерную для систем РАЗ систематическую погрешность измерения скорости звука и может быть рекомендован к широкому использованию в расдарах различного назначения.

Электромагнитный сигнал радиоакустических систем менее подвержен воздействию изменяющихся метеоусловий и выбирается, исходя из соображений обеспечения качественных измерений соответствующих информативных параметров принимаемого колебания. Для выполнения доплеровских измерений наиболее подходящими видами излучения являются непрерывное монохроматическое излучение, импульс достаточно большой длительности с постоянной частотой заполнения, или импульсная последовательность с малой скважностью. Применение непрерывных колебаний (или достаточно длинного импульса) с точки зрения простоты формирования зондирующего и обработки отраженного сигналов более предпочтительно, чем квазинепрерывного. Однако использование импульсной последовательности с малой скважностью позволяет обойтись одной радиоантенной, сохраняя при этом возможность выполнения измерений на малых дальностях, и обеспечивает значительные энергетические преимущества перед непрерывным излучением за счет устранения влияния паразитного сигнала передающего устройства на приемное. Применяя непрерывное монохроматическое электромагнитное колебание, следует предусмотреть возможность комплексирования амплитудных и доплеровских измерений.

Очень перспективным представляется совместное использование акустического сигнала с комплексной огибающей вида  $\sin(r)/r$  и оптимизированной последовательности радиоимпульсов, имеющей малую скважность, которые при одной радиоантенне обеспечивают высокую оперативность, пространственную разрешающую способность и точность измерений. Особенно актуально применение таких сигналов в комбинированных системах «профилер- РАЗ» вследствие расширения диапазона исследуемых высот, прежде всего в сторону малых дальностей, и повышения точности измерений.

При одинаковых формах зондирующих акустического и электромагнитного колебаний и определенном соотношении их пространственных протяженностей рассеянный радиосигнал имеет вид, как и на выходе согласованного оптимального фильтра. Такие векторные радиоакустические сигналы найдут применение при проектировании перспективных радиоакустических станций.

Заметим, что разработка методов исследования и оптимизации зондирующих радиоакустических сигналов позволяет разработчику, используя ПЭВМ в процессе проектирования, конструировать собственное тело рассеяния в соответствии со своими замыслами, устремле-

ниями и предъявляемыми к системе требованиями. Более того, появляется предпосылка для адаптивного построения (выбора) сигналов в процессе функционирования системы, исходя из складывающейся внешней обстановки.

**Список литературы:** 1. *Карташов В.М* Синтез зондирующих сигналов радиоакустических систем // Радиоэлектроника и информатика. 2001. №3. С. 4 – 6. 2. *Карташов В.М.* Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2001. Вып. 118. С. 61 – 65. 3. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1971. 367 с.

*Харьковский национальный  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.12.2002*