



СИНТЕЗ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ РАДИОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КАРТАШОВ В.М.

Разрабатывается метод аналитического синтеза векторных зондирующих сигналов радиоакустических систем по заданной функции рассеяния. Описываются результаты синтеза при различных видах функционала качества.

Вид и параметры используемых зондирующих сигналов оказывают определяющее влияние на структуру и основные показатели качества локационных систем. В соответствии с этим возникает необходимость в синтезе сигналов, обладающих некоторыми желаемыми свойствами. Для систем радиолокации и связи разработаны методы синтеза и оптимизации форм излучаемых колебаний [1], основанные на использовании функции неопределенности, которая представляет собой отклик системы на сигнал, отраженный от движущегося точечного объекта.

1. Постановка задачи

В радиоакустических системах (РАС) зондирования атмосферы излучаются акустические и электромагнитные волны. При этом рассеивающий объект, создаваемый акустическим сигналом, не является точечным частотно-независимым отражателем. Он изменяет при рассеянии форму излучаемых электромагнитных колебаний, а следовательно, деформируется и тело неопределенности [2]. Задача синтеза зондирующих сигналов для РАС должна состоять в совместной оптимизации структур и параметров двух взаимосвязанных видов сигналов — электромагнитного и акустического.

Введем некоторый термин, обозначающий пару из акустического и электромагнитного сигналов. Основания для этого следующие: всякий ансамбль из двух сигналов, например, простой акустический импульс и непрерывное немодулированное радиоизлучение, линейно-частотно модулированный акустический импульс и простой радиоимпульс, а также другие комбинации, число которых может быть достаточно большим, определяются значениями показателей качества и телом рассеяния, характерными только для данной пары. При изменении вида одного из сигналов, независимо акустического или электромагнитного, получается новое сигнальное образование, для которого показатели качества и тело рассеяния будут другими.

В соответствии с этим введем в рассмотрение понятие “радиоакустический сигнал”, под которым будем понимать векторный (многомерный)

зондирующий сигнал, состоящий из двух сигнальных компонент, одномерных акустического s и электромагнитного e колебаний. Если векторный радиоакустический сигнал является функцией времени t , то он записывается как $\vec{v}^T(t) = |e(t), s(t)|$, если $\vec{v}$ — функция пространства r , то, соответственно, $\vec{v}^T(r) = |e(r), s(r)|$. Радиоакустический сигнал может быть записан также через векторную комплексную огибающую: $\vec{v}^T(r) = |E(r), S(r)|$, где S, E — комплексные огибающие акустического и радиосигнала.

Предположим, что число возможных видов одномерных зондирующих колебаний $n = 20$. Тогда количество возможных векторных радиоакустических сигналов, определяемое как число сочетаний, $C_{20}^2 = 190$; если $n = 30$, то $C_{30}^2 = 435$, при $n = 40$ имеем $C_{40}^2 = 780$.

Приведенные данные свидетельствуют об относительной трудности задачи выбора и синтеза сигналов для радиоакустических систем по сравнению с аналогичной задачей для систем радиолокации и связи; первая из этих задач также качественно более сложна.

Основными в задаче синтеза сигналов для РАС являются выражения, определяющие взаимокорреляционную функцию зондирующих акустического и электромагнитного сигналов или рассеянный электромагнитный сигнал:

$$F(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r') S^*(r' - r) e^{jq'r'} dr', \quad (1)$$

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

в силу их физической содержательности, конструктивности и относительной простоты. Здесь r, q — рассогласование сигналов в пространстве и в области волновых частот соответственно; S_E, S_S — пространственные спектры соответствующих комплексных амплитуд.

2. Синтез сигналов по функции рассеяния

До введения двумерной взаимокорреляционной функции задача синтеза радиоакустических сигналов напрямую не ставилась, поскольку в условиях отсутствия адекватной конструктивной модели, отображающей физическую сущность процессов рассеяния волн в атмосфере, методы решения данной задачи были неочевидны. Осуществлялся только косвенный синтез сигналов посредством их анализа, представляющего собой достаточно сложные и громоздкие математические процедуры.

Формально задача синтеза векторного радиоакустического сигнала по функции рассеяния может быть представлена следующим образом: в уравнениях (1) или (2) при заданной функции $F(r, q)$ требуется найти виды сигналов S и E или их спектров, удовлетворяющих этим уравнениям.

Формулировка задачи может быть также такой: при заданных функциях $F(r, q)$ и S (или E) требуется

найти вид другого сигнала - E (или S), удовлетворяющего (1). Задача выглядит аналогично, если использовать при постановке соотношение (2) и входящие в него величины.

Выражения (1) и (2) представляют собой линейные интегральные уравнения 1-го рода. В общем случае решение таких уравнений относительно одного из членов, стоящих в правой части, задача достаточно непростая. В данном случае для нахождения решения воспользуемся следующим обстоятельством: равенство (1) содержит интеграл Фурье по переменной r' . Выполним обратное преобразование Фурье функции (1), получим

$$E(2r')S^*(r'-r) = \int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jq'r'} dq. \quad (3)$$

Тогда пространственная структура радиосигнала при заданном акустическом сигнале определяется выражением

$$E(2r') = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jq'r'} dq}{S^*(r'-r)}. \quad (4)$$

Если положить в (4) сдвиг (рассогласование) между сигналами $r = 0$, то получим более простое соотношение:

$$E(2r') = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(0, q)e^{-jq'r'} dq}{S^*(r')}. \quad (5)$$

Формула, определяющая вид акустического сигнала, полученная из (3), записывается в виде

$$S^*(r'-r) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jq'r'} dq}{E(2r')}. \quad (6)$$

Для решения уравнения (2) преобразуем аналогично его правую и левую части с помощью интегрального преобразования Фурье:

$$S_E\left(\frac{k}{2}\right)S_S^*(k-q) = \int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jkr} dr. \quad (7)$$

Используя последнее равенство и предполагая, что форма спектра акустического сигнала известна, запишем выражение для пространственного спектра радиосигнала:

$$S_E\left(\frac{k}{2}\right) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jkr} dr}{S_S^*(k-q)}. \quad (8)$$

Если частотный сдвиг между сигналами (расстройка условия Брэгга) $q = 0$, то формула (8) приобретает более простой вид:

$$S_E\left(\frac{k}{2}\right) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(r, 0)e^{-jkr} dr}{S_S^*(k)}. \quad (9)$$

Соотношение, определяющее спектр акустического сигнала, получим из (7) и запишем в следующей форме:

$$S_S^*(k-q) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(r, q)e^{-jkr} dr}{S_E(k/2)}. \quad (10)$$

Упрощенное решение (9) можно получить из выражения (1), положив в нем $q = 0$:

$$F(r, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r')S^*(r'-r)dr'.$$

Данное равенство является интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода; в правой его части имеем скалярное произведение функций, которое можно представить в виде свертки. Тогда решение уравнения можно найти на основании известного свойства преобразованного соотношения: пространственный спектр функции, стоящей в левой части выражения, будет равен произведению спектров функций правой части.

Соответственно, решение (5) можно получить аналогичным путем из (2) при $r = 0$.

При синтезе сигналов необходимо иметь в виду, что не всякая двумерная функция может быть функцией рассеяния, а только такая, преобразование Фурье которой записывается в виде произведения двух комплексно-сопряженных множителей. Следовательно, если, задав некоторую функцию $F(r, q)$ и определив вид акустического сигнала $S(r')$, попытаться найти соответствующий радиосигнал, в ансамбле с которым $S(r')$ формирует функцию $F(r, q)$, то решения может и не существовать. Причин отсутствия решения две: 1) заданная функция $F(r, q)$ не может быть функцией рассеяния; 2) решение существует при некотором другом виде акустического сигнала.

Определим задачу синтеза радиоакустических сигналов в терминах функционального анализа [3], что позволит использовать наглядные геометрические образы и представление, при котором сигналы рассматриваются как элементы некоторого пространства, свойства сигналов — как свойства пространства, а преобразование сигналов, например при рассеянии, — как отображение одного пространства в другое. При таком подходе различные зависимости и свойства сигналов получают наглядное геометрическое описание, что существенно упрощает понимание и решение рассматриваемых задач.

Геометрическая интерпретация задачи синтеза векторного радиоакустического сигнала следующая. Имеется гильбертово пространство сигналов H , в котором заданы множества допустимых акустических S_M и электромагнитных E_M сигналов. Имеется также гильбертово пространство H' , включающее в себя произвольные функции двух переменных. Оператор (1), осуществляющий негеометрическое преобразование, отображает множества S_M и E_M на пространство H' , определяя некоторую область F_M , соответствующую множеству функций рассеяния.

Синтез сигналов по заданной функции рассеяния F , принадлежащей области F_M , состоит в определении функций E и S , реализующих F . Для этого необходимо возвратиться из пространства H' в исходное пространство сигналов H .

При решении задачи синтеза возможны также следующие ситуации. Заданная желаемая функция двух переменных может не принадлежать области F_M функций рассеяния, либо найденный по функции F сигнал E (или S) не принадлежит некоторому множеству реализуемых сигналов E_R . В этом случае возникает задача наилучшей аппроксимации сигнала (функции одной переменной) или функции двух переменных.

3. Оптимизация вида акустического сигнала

Существенную роль в обеспечении точности и пространственного разрешения радиоакустических измерений играет вид используемого акустического излучения. Учитывая, что для многих акустических сигналов приемлемым с точки зрения совместного использования можно считать непрерывное радиоизлучение, рассмотрим отдельно задачу оптимизации акустического сигнала по ряду критериев.

Энергетический подход к задаче оптимизации состоит в выборе такого акустического сигнала, который при заданной пространственной протяженности l имеет наибольшую энергию в заданной полосе частот $(-K, K)$:

$$E_K = \frac{1}{2\pi} \int_{-K}^K |S_S(k)|^2 dk. \quad (11)$$

Представив в (11) спектры через их преобразования Фурье, получим

$$E_K = \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} S(r') S^*(r) D_K(r, r') dr dr',$$

$$\text{где } D_K(r, r') = \frac{1}{2\pi} \int_{-K}^K e^{jk(r-r')} dk = \frac{\sin K(r-r')}{\pi(r-r')}.$$

Искомый сигнал должен удовлетворять интегральному уравнению с ядром $D_K(r, r')$ [4]:

$$\int_{-1/2}^{1/2} S(r') D_K(r, r') dr' = \lambda S(r), \quad (12)$$

здесь λ — собственные значения; $S(r)$ — собственные функции уравнения; число и тех и других может быть отлично от единицы.

Для нормированных сигналов каждое собственное значение λ_i численно равно энергии, заключенной в полосе $(-K, K)$. Следовательно, сигнал с наибольшей величиной E_K представляет собой собственную функцию уравнения (12), соответствующую максимальному собственному значению. Этому условию отвечает одна из сфероидальных функций [4], характеризующихся параметром $c = Kl/2$. Ни один сигнал с заданной протяженностью l не может иметь большей энергии в заданной полосе частот $2K$. При малых значениях параметра c сфероидальные функции достаточно хорошо аппроксимируются функцией вида $\frac{\sin(2\pi Kr)}{\pi t}$, при $c > 2$ они приобретают явно колоколообразный характер.

Результаты, полученные при чисто энергетическом подходе к задаче синтеза вида зондирующего аку-

стического излучения, не позволяют обеспечить необходимой точности измерений в доплеровском режиме вследствие ошибок, вызванных существенной неравномерностью спектральной плотности в диапазоне волновых чисел рассеяния. В соответствии с этим возникает задача синтеза звукового сигнала с постоянной спектральной плотностью в диапазоне пространственных частот $(-K, K)$. Этому условию отвечает, как известно [5], сигнал с огиба-

ющей вида $s(r) = \frac{\sin(Kr)}{Kr}$. Данная функция характеризуется достаточно высокой степенью концентрации энергии в пространстве (во времени).

Критерием оптимальности звукового сигнала может быть также максимальная степень концентрации энергии в заданном диапазоне расстояний при заданной полосе частот $2K$, что соответствует минимально возможному пространственному разрешению выполняемых радиоакустических измерений. Оптимальность по этому критерию, как и в случае максимальной концентрации энергии в полосе частот, достигается при использовании сфероидальных функций [1] с определенными значениями параметра c . Отметим также, что минимальным произведением длительности сигнала на занимаемую им полосу частот обладает гауссов импульс, который, как говорят, глобально оптимален [5].

Заключение

В данной работе предложен аналитический метод синтеза видов излучаемых колебаний, однако возможности оптимизации сигналов систем зондирования атмосферы не исчерпываются использованием только аналитических методов. При наличии конструктивных выражений (1), (2) широкие возможности по исследованию сигналов предоставляют также численные методы и соответствующие вычислительные средства. Эвристический подход, основанный на глубоком не формальном понимании процессов, имеющих место при рассеянии волн в атмосфере, а также знании теории сигналов, позволяет проявлять творчество и инженерную изобретательность. При таком подходе могут быть использованы самые разнообразные критерии и условия оптимизации, а применение достаточно мощных компьютеров позволяет анализировать различные комбинации сигналов и осуществлять быстрый поиск оптимальных и приемлемых вариантов.

Литература: 1. Вакман Д. Е., Седлецкий Р. М. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1973. 312 с. 2. Goupil P., Klaus V., Cherel G., Durbe R. On the Use of the Wavelet-Packet Transform to Improve the Measurement of the RASS Temperature Profiles // Proc. 9 Int. Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere. Vienna, 1998. P. 76-79. 3. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1989. 624 с. 4. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с. 5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. 448 с.

Поступила в редколлегия 05.02.2001

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Прошкин Е. Г.

Карташов Владимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант ХНУРЭ. Научные интересы: методы дистанционного зондирования атмосферы. Увлечения: спорт, автомобиль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: 40-95-87.