

УДК 551.501.8:621.396.96

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА СЛОЖНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ ПРИ РАДИОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

В. М. Карташов

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

Контактный тел.: 097-736-06-65

E-mail: res@kture.kharkov.ua

С. В. Пащенко

Инженер*

E-mail: res@kture.kharkov.ua

Д. М. Куля

Аспирант*

Контактный тел.: 050-293-81-60

E-mail: d.kylay@mail.ru

М. В. Кушнир

Аспирантка*

Контактный тел.: 093-307-73-53

E-mail: misua_777@mail.ru

*Кафедра радиоэлектронных систем

Харьковский национальный университет радиоэлектроники пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166

У статті проаналізовано особливості розсіювання радіохвиль на акустичних хвильових пакетах, створювані складними звуковими зондуючими сигналами, в системах радіоакустичного зондування атмосфери. Показано наявність специфічних похибок при оцінюванні інформаційних параметрів радіосигналів, розсіяних на складних акустичних зондувальних імпульсах

Ключові слова: радіоакустичне зондування атмосфери, тіла розсіювання, складний звуковий зондуючий сигнал

В статье проанализированы особенности рассеяния радиоволн на акустических волновых пакетах, создаваемых сложными звуковыми зондирующими сигналами, в системах радиоакустического зондирования атмосферы. Показано наличие специфических ошибок при оценивании информационных параметров радиосигналов, рассеянных на сложных акустических зондирующих сигналах

Ключевые слова: радиоакустическое зондирование атмосферы, тела рассеяния, сложный звуковой зондирующий сигнал

1. Введение

Потенциальные возможности извлечения информации системами радиоакустического зондирования атмосферы зависят от свойств совокупности зондирующих сигналов – акустического и электромагнитного колебаний [1].

Значительное внимание в литературе уделено простым акустическим зондирующим сигналам [1-5]. Однако недостатком таких сигналов является уменьшение диапазона волновых чисел рассеяния при увеличении пространственной протяженности звуковых сигналов; и, наоборот, при уменьшении пространственной протяженности излучаемых колебаний растет полоса пространственных частот, но уменьшается энергетическая эффективность взаимодействия акустического и радио сигналов.

Простейшим способом увеличения диапазона волновых чисел рассеяния без изменения пространственной протяженности излучаемых колебаний является введение частотной модуляции или фазовой манипуляции в акустический сигнал.

2. Фазовая пространственная структура акустического сигнала

При решении задач рассеяния радиоволн на возмущениях, создаваемых акустическими волнами, а также задач рассеяния акустических волн на объектах следует принимать во внимание, что фазовая структура пространственного акустического сигнала определяется соотношением

$$\phi(r) = \int_0^r k(r') dr' = \int_0^r \frac{2\pi}{c_s(r')} f(r') dr', \tag{1}$$

где r - пространственная координата, c_s - скорость звука, f - временная частота, k - пространственная частота.

Если $f(r') = f = \text{const}$, то $\phi(r) = \omega \int_0^r \frac{1}{c_s(r')} dr'$.

Если же $c_s(r') = c_s = \text{const}$, то $\phi(r) = \frac{2\pi}{c_s} \int_0^r f(r') dr'$.

Проанализируем случай, когда изменение пространственной частоты в пределах акустического импульса происходит по линейному закону

$$k(r) = k_0 + \frac{\Delta k_m}{l_s} r, \quad -\frac{l_s}{2} \leq r \leq \frac{l_s}{2}, \quad (2)$$

где k_0 - средняя (соответствующая несущей) пространственная частота; Δk_m - девиация пространственной частоты; l_s - протяженность сигнала.

Тогда фаза колебаний в точке r равна

$$\phi(r) = \int_0^r k(r') dr' = k_0 r + \frac{\Delta k_m}{2 l_s} r^2 = k_0 r + \frac{b}{2} r^2, \quad (3)$$

где $b = \Delta k_m / l_s$ - коэффициент, характеризующий скорость изменения пространственной частоты по пакету.

Поскольку физическими причинами изменения пространственной частоты сигнала могут быть как непостоянство временной частоты f в пределах излучаемого импульса, так и наличие пространственных градиентов метеопараметров, приводящих к изменению скорости звука по трассе зондирования, то девиация Δk_m может быть представлена в виде суммы двух слагаемых $\Delta k_m = \Delta k_b + \Delta k_p$. Δk_b , Δk_p - частные девиации пространственной частоты, обусловленные соответственно особенностями временной структуры сигнала и пространственной неоднородности атмосферы.

Δk_b связана с девиацией временных частот Δf соотношением

$$\Delta k_b = \frac{2\pi}{c_{sc}} \Delta f, \quad (4)$$

где c_{sc} - средняя по пакету скорость звука.

Скорость изменения пространственной частоты вследствие изменения метеопараметров описывается выражением

$$b_p \frac{dk(r)}{dr} = \omega \frac{d}{dr} [c_s(r)]^{-1} = \omega \frac{d}{dr} [a_k \sqrt{T_0(r)} + V(r)]^{-1} = -\frac{\omega}{[a_k \sqrt{T_0(r)} + V(r)]^2} \left[\frac{a_k}{2\sqrt{T_0(r)}} \frac{dT_0(r)}{dr} + \frac{dV(r)}{dr} \right], \quad (5)$$

где V - скорость радиального ветра;

a_k - константа.

Приближенно можно считать, что

$$\frac{dk(r)}{dr} = -\frac{\omega}{c_{sc}^2} \left[0,61 \frac{dT_0}{dr} + \frac{dV}{dr} \right].$$

Тогда

$$\Delta k_p = l_s \frac{dk(r)}{dr} = -\frac{L\omega}{c_{sc}^2} \left[0,61 \frac{dT_0}{dr} + \frac{dV}{dr} \right].$$

Комплексную огибающую ЛЧМ акустического сигнала представим в виде

$$S(r) = S_0(r) \exp \left[j \frac{b}{2} r^2 \right] = S_0(r) \exp \left[j \frac{\Delta k_m}{2 l_s} r^2 \right]. \quad (6)$$

Обозначив $\Delta k_m l_s = D$, получим

$$S(r) = S_0(r) \exp \left[j \frac{D}{2} \left(\frac{r}{l_s} \right)^2 \right].$$

Для сигналов с большим значением D ($D \gg 1$) девиация Δk_m практически совпадает с полосой пространственных частот, занимаемой сигналом, а D принимает смысл базы сигнала.

Следует заметить, что «модуляция средой» акустического импульса может приводить как к увеличению значений Δk_m и D сложного сигнала, так и к их уменьшению, если знаки коэффициентов b_b и b_p не совпадают.

Величина параметра D , полученная вследствие влияния пространственных градиентов метеопараметров $D_p = \Delta k_p l_s$, как правило, не превышает 5-7, а значение $D_b = \Delta k_b l_s$ определяется девиацией Δf . Во временном и пространственном представлениях при постоянной скорости звука по пакету значения базы сигнала одинаковы.

3. Тела рассеяния при использовании акустического импульса с ЛЧМ

Проанализируем более детально с помощью метода компьютерного моделирования, какие изменения претерпевают тела рассеяния изучаемых сигналов при введении в звуковой сигнал линейной частотной модуляции при постепенном увеличении значения девиации пространственной частоты Δk .

На рис. 1 представлены тела рассеяния сложного акустического сигнала с прямоугольной огибающей и простого радиоимпульса, имеющего огибающую гауссовской формы, для разных значений скорости изменения

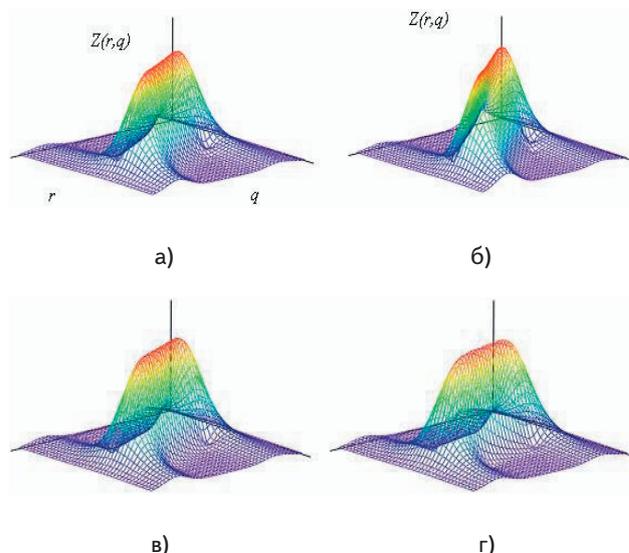


Рис. 1. Тела рассеяния сложного акустического сигнала с прямоугольной огибающей и простого радиоимпульса, имеющего огибающую гауссовской формы, для различных значений параметров модуляции а) $D=4,5$; б) $D=9$; в) $D=18$; г) $D=23$ пространственной частоты и базы звукового импульса

Как видно из представленных рисунков, полученных методом компьютерного моделирования, основной лепесток тела рассеяния "разворачивается", т.е. происходит уширение тела вдоль оси q и расширяется диапазон волновых чисел взаимодействия зондирующих сигналов, но с другой стороны, это сопровождается уменьшением длительности рассеянных радиосигналов.

Физической причиной уменьшения длительности сигнала является уменьшение протяженности пространственной области эффективного взаимодействия акустического и электромагнитного колебаний вследствие наличия модуляции параметров по пространству. Пространственная неоднородность, создаваемая звуковой волной, становится в этом случае, неоднородной, модулированной по пространству, и узкополосный радиосигнал эффективно взаимодействует только с некоторой областью акустического волнового пакета. В то же время, модуляция средней звуковой пакета не является столь критичной в плане уменьшения амплитуды рассеянного сигнала, как это имеет место при использовании узкополосных акустических сигналов, поскольку радиосигнал все равно «находит» резонансные области взаимодействия в сложно модулированной пространственной области.

Как можно видеть, тела разворачиваются относительно оси Z=0 на угол, пропорциональный девиации частоты Δk.

Это влечет за собой смещение в пространстве рассеянного радиосигнала при изменении параметра расстройки условия Брэгга.

Аналогичный поворот имеет место и в теле неопределенности ЛЧМ радиоимпульса, однако сжатия рассеянного сигнала в данном случае не наблюдается. При наличии расстройки q ≠ 0 поворот тела проявляется как смещение максимума рассеянного сигнала во времени, определяющее ошибку измерения времени запаздывания или дальности до цели. Подобные ошибки расстройки свойственны процедурам, сводящимся к вычислению корреляционного интеграла [7].

Значительный интерес представляет спектральный вид тел рассеяния сложных сигналов, например, акустического импульса с ЛЧМ и радиоимпульса с гауссовой огибающей (рис. 2). Как можно заметить, главный лепесток тела рассеяния имеет ряд максимумов.

Кроме того, при прочих равных условиях спектральное тело рассеяния данного радиоакустического сигнала имеет больший диапазон расстроек, чем для тел рассеяния простых сигналов.

Расширение области волновых чисел определяется соотношением $\sqrt{\frac{\Delta k}{2I_s}}$ или значением базы акустического импульса.

Рассмотрим более детально особенности взаимодействия акустического и электромагнитного колебаний в атмосфере с использованием частотных представлений.

На рис. 3 показан пространственный спектр зондирующего импульсного акустического сигнала, имеющего значение базы D=64, и пространствен-

ный спектр простого зондирующего радиосигнала. Радиосигнал имеет гораздо большую пространственную протяженность, чем звуковой сигнал, кроме того, его спектр сжат в два раза, поэтому спектр радиосигнала охватывает гораздо меньшую область пространственных волновых частот.

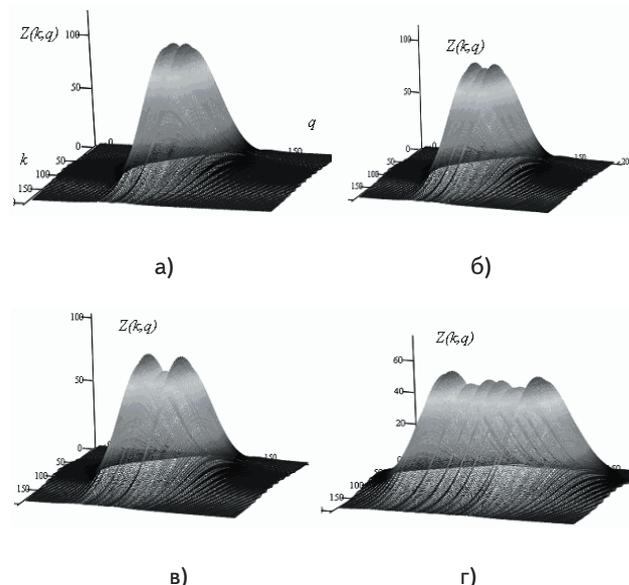


Рис. 2. Спектральные тела рассеяния для ЛЧМ акустического и простого радиоимпульса с гауссовскими огибающими при различных значениях базы акустического сигнала а) D = 24, б) D = 32, в) D = 40, г) D = 72

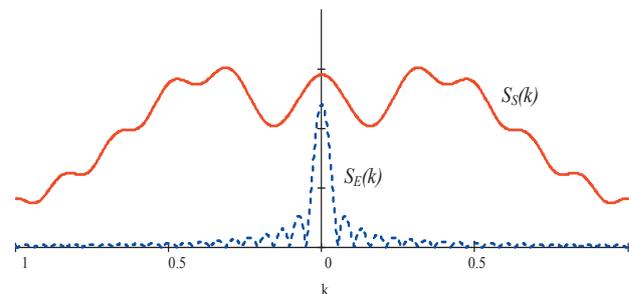


Рис. 3. Пространственные спектры взаимодействующих импульсного акустического сигнала S_S(k), имеющего значение базы D = 64, и пространственного спектра простого зондирующего радиоимпульса S_E(k)

При значении параметра расстройки условия Брэгга q = 0 оба спектра располагаются симметрично друг относительно друга и относительно оси k = 0. Как следует из выражения

$$F(r, q) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_E(k) S_S^*(2k + q) e^{-jk r} dk, \tag{7}$$

рассеянный на звуке радиосигнал определяется взаимным энергетическим пространственным спектром взаимодействующих колебаний, т.е. произведением спектров.

Как видно, формула (7), определяющая полученный в результате рассеяния радиосигнал, содержит

преобразование Фурье взаимного энергетического пространственного спектра акустического и радиосигнала.

Вид и параметры пространственного спектра, заложенного в сигнал при рассеянии, в значительной степени влияют на качественные характеристики получаемых оценок параметров сигналов и параметров атмосферы в радиоакустических системах зондирования атмосферы.

С изменением по трассе зондирования метеопараметров изменяется значение параметра расстройки q , что приводит к перемещению по горизонтальной оси пространственного спектра звукового сигнала. В соответствии с этим, при наличии расстройки условия Брэгга, максимум или центр тяжести пространственного спектра рассеянного сигнала смещается дополнительно при рассеянии на величину Δk вследствие неравномерности и несимметричности спектральной функции звукового сигнала $|S_x(k)|$ в диапазоне перекрытия спектров. Этот фактор и приводит к смещению максимума спектра временных частот рассеянного сигнала на величину $\Delta\omega = c\Delta k$ (где c - скорость распространения электромагнитных волн) и отличию получаемого частотного смещения от чисто доплеровского. На рис. 4 представлены пространственные спектры рассеянных радиосигналов, полученные при различных значениях параметра расстройки q .

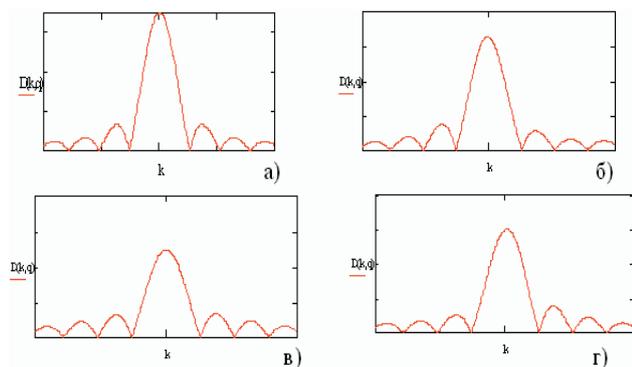


Рис. 4. Пространственные спектры рассеянных радиосигналов, полученные при различных значениях параметра расстройки q : а) $q = 0$, б) $q = 0,06$, в) $q = 0,18$, г) $q = 0,23$

Как видно из приведенных тел рассеяния, использование сложных, в частности ЛЧМ зондирующих звуковых колебаний, позволяет существенно расширить область волновых чисел эффективного взаимодействия излучаемых сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы и позволяет получать достаточный по амплитуде отраженный радиосигнал со всех высот зондирования от одной акустической посылки без подстройки частот сигналов под условие Брэгга.

Это качество сложных звуковых колебаний позволяет существенно повысить оперативность станций радиоакустического зондирования атмосферы при измерении вертикальных температурных профилей атмосферы.

Однако детальный анализ тел рассеяния, полученных с использованием таких сигналов, показывает, что для них также характерно наличие специфической погрешности оценивания скорости звука.

Это объясняется, прежде всего, тем, что пространственный спектр сложных сигналов, в частности ЛЧМ и ФКМ звуковых импульсов, является существенно неравномерным.

4. Выводы

Анализ рассмотренных форм акустического излучения позволяет сделать следующие выводы. В доплеровских системах применение импульсов с нелинейной ЧМ нецелесообразно, более предпочтительны сигналы с линейной ЧМ.

Из рассмотренных сигналов с линейной частотной модуляцией (манипуляцией) лучшими возможностями обладает ЛЧМ импульс с несимметричным законом модуляции. При используемых на практике значениях параметра D ЛЧМ импульсов ($\approx 30 - 100$) в законы фазовой и амплитудной модуляции следует вводить «предыскажения», чтобы уменьшить амплитудные пульсации спектра. ФКМ импульсы также характеризуются расширением тела рассеяния вдоль оси q , однако, оно получается изрезанным, пикоподобным. Подобная структура тела свидетельствует о значительных по величине нормальных ошибках и возможностях появления аномальных погрешностей при оценивании информативных параметров рассеянного сигнала – частоты или времени запаздывания.

Литература

1. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы: Монография. Харьков: 2011.-230 с.
2. Карташов В.М., Пашенко С.В. Анализ сигналов, рассеянных когерентными неоднородностями среды //Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. – техн. сб. – Харьков.-2010.-№163-С.248-255.
3. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985. -200с.
4. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1986. – 167 с.
5. Макарова Т.О. О нелинейном поглощении звука в задачах акустического и радиоакустического зондирования атмосферы //Иzv. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1980. – Т.16, №2.-С.195-197.
6. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Abstract

The characteristics of the radio waves scattering over the acoustic wave packets created by sophisticated acoustic sounding signals in radio acoustic sounding systems of atmosphere are analyzed. In this case, there is an expansion of the scattering body along spatial frequencies, expanding the wave numbers range of effective interaction acoustic sounding and electromagnetic signals, and a decrease in the duration of the scattered radio signals is also observed. The physical reason signal length decrease is the signal length duration spatial domain decrease of acoustic and electromagnetic waves, due to the presence of modulation parameters in space. The form and parameters of the spatial spectrum, that is embedded in the scattering signal, in a great degree acts on the quality characteristics resulting estimates of signal parameters and atmospheric parameters. The presence of specific errors in the estimation of the Doppler frequency information parameters and radio signals time delay, scattered on the complex acoustic sounding signals is shown. The use of sound oscillations can significantly increase the efficiency of the radio acoustic sounding stations when measuring vertical temperature profiles of the atmosphere

Keywords: radio acoustic sounding of atmosphere, dispersion bodies, complex acoustic signal

Робота присвячена аналізу використання методу еквалізації в LTE системах з різними конфігураціями MIMO з метою підвищення характеристик якості зв'язку

Ключові слова: LTE, MIMO, просторово-часове кодування, адаптивний еквалайзер, Zero Forcing, метод мінімуму середньоквадратичної помилки

Робота посвящена анализу использования метода эквализации в LTE системах с различными конфигурациями MIMO с целью повышения характеристик качества связи

Ключевые слова: LTE, MIMO, пространственно-временное кодирование, адаптивный эквалайзер, Zero Forcing, метод минимума среднеквадратической ошибки

УДК 621.396

USING ADAPTIVE EQUALIZING IN LTE WITH MIMO

Al-Janabi Hussam Dheaa
Graduate student

Department of Telecommunication Systems
Kharkiv National University of Radio Electronics
Lenina, 14, Kharkov, Ukraine, 61166
Contact tel.: 063-651-11-06
E-mail: en.husam @ mail.com

1.Introduction

Equalization is the process of adjusting the balance between frequency components within an electronic signal. It has important applications in telecommunications. Equalization is used to render the frequency response and prepare data signals for transmission. When a channel has been "equalized" the frequency domain attributes of the signal at the input are faithfully reproduced at the output.

Equalizers are critical to the successful operation of LTE systems. In this application the actual waveform of the transmitted signal must be preserved, not just its frequency content. Adaptive Equalizer filters must cancel out any group delay and phase delay between different frequency components. Especially in broadband applications where Intersymbol Interference (ISI) is a critical factor. Equalizers are employed to reduce such interference. MIMO systems transmits different signals from each transmit element so that the receiving antenna array receives a superposition of all the transmitted signals.

2. Intersymbol Interference and Equalization

The all-pass assumption made in the AWGN (or non-dispersive) channel model is rarely practical. Due to the scarcity of the frequency spectrum, we usually filter the transmitted signal to limit its bandwidth so that efficient sharing of the frequency resource can be achieved. Moreover, many practical channels are bandpass and, in fact, they often respond differently to inputs with different frequency components, i.e., they are *dispersive*. We have to refine the simple AWGN (or non-dispersive) model to accurately represent this type of practical channels. One such commonly employed refinement is the *dispersive* channel model1

$$r(t) = u * h_c(t) + n(t), \tag{1}$$

where $u(t)$ - the transmitted signal, $h_c(t)$ - the impulse response of the channel, $n(t)$ - AWGN with power spectral density $N_0 / 2$.

In essence, we model the dispersive characteristic of the channel by the linear filter $h_c(t)$. The simplest dispersive