

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ НА ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Задача выбора видов и параметров зондирующих сигналов является одной из наиболее важных при проектировании локационных систем, так как ее результат предопределяет, по существу, значения основных информационных характеристик, а также структуру проектируемой системы. Для радиоакустических и акустических систем зондирования атмосферы в настоящее время не существует приемлемой процедуры, позволяющей осуществлять анализ характеристик сигналов, а следовательно, производить аргументированный и акцентированный их выбор. В данной статье рассматривается подход, позволяющий анализировать свойства и особенности различных видов зондирующих сигналов, в том числе особенности различных комбинаций из акустической и электромагнитной волн для радиоакустических систем. Предлагаемая методика позволяет производить также синтез структур сигналов.

Как показано в [1], при рассеянии излученных волн на объектах, используемых в акустических и радиоакустических системах зондирования атмосферы, формируется взаимокорреляционная функция излученного сигнала и рассеивающей неоднородности:

$$y(r_1) = \int_{-\infty}^{\infty} e(2r)s(r-r_1)dr, \quad (1)$$

где $y(r_1)$ – рассеянный сигнал; e – зондирующий сигнал; s – неоднородность атмосферы (для радиоакустических систем – это акустическая волна), далее для удобства s будем называть также сигналом; r – пространственная координата в направлении зондирования.

Правая часть равенства (1) может быть переписана в пространстве волновых чисел k в виде:

$$y(r_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_e\left(\frac{k}{2}\right) S_{sr}^*(k) dk, \quad (2)$$

где $S_e(k/2)$, $S_{sr}(k)$ – пространственные спектры соответствующих процессов, индекс r в последнем члене означает, что Фурье-отображение соответствует сдвинутой по дальности на расстояние r_1 неоднородности.

Спектр смещенного в пространстве сигнала, как известно, определяется выражением $S_{sr}(k) = S_s(k)e^{-jkr_1}$. Подставив последнее соотношение в (2), имеем:

$$y(r_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_e\left(\frac{k}{2}\right) S_s^*(k) e^{jkr_1} dk = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y\left(\frac{k}{2}\right) e^{jkr_1} dk. \quad (3)$$

Величина $S_y(k/2)$ представляет собой взаимный энергетический пространственный спектр процессов e и s :

$$S_y(k/2) = S_e(k/2) S_s^*(k). \quad (4)$$

Выражение (3), определяющее рассеянный сигнал, представляет собой преобразование Фурье взаимного энергетического пространственного спектра зондирующих колебаний. Здесь и далее в отношении e и s будем использовать для удобства терминологию радиоакустических систем. При $r_1 = 0$ в правой части (3) имеем корреляционный интеграл по пространственной частоте спектральных плотностей сигналов, совмещенных в пространстве. При любом другом фиксированном значении r_1 правая часть (3) также представляет собой корреляционный интеграл по частоте k , но уже для сигналов, смещенных на расстояние r_1 .

Понятия взаимного энергетического пространственного спектра и корреляционной функции сигналов по пространственной частоте играют ключевую роль в понимании особенностей процессов рассеяния и формирования отраженной волны в системах зондирования атмосферы. По существу можно сказать, что взаимный энергетический пространственный спектр (в форме спектра временных частот) воспроизводится на выходе спектроанализатора радиоакустической системы, выполняющего анализ рассеянной волны. Действительно, сформированный в результате рассмотренных преобразований пространственно-временной сигнал достигает приемной антенны и преобразуется во временное колебание. После соответствующих преобразований и фильтрации в приемнике системы информационный сигнал, как правило, подвергается преобразованию Фурье, т. е., по существу, воспроизводится взаимный энергетический пространственный спектр взаимодействующих сигналов.

Естественно, что форма воспроизведенного спектра, заложенного в сигнал при рассеянии, а также его параметры, характеризующие, например, несимметричность или «скошенность» спектра, кардинальным образом влияют на значения основных информационных характеристик систем зондирования атмосферы.

Рассмотрим рассеяние волн в радиоакустических системах и покажем, что вид, параметры и принципиальная возможность существования рассеянного радиосигнала, полученного от звуковой посылки, полностью определяются особенностями взаимного энергетического пространственного спектра зондирующих акустического и электромагнитного колебаний. В радиоакустических системах $s(t, r)$ – излучаемый акустический сигнал. Достаточно распространено использование в качестве $s(t, r)$ импульсных акустических колебаний с гармоническим заполнением. В этом случае спектр $S_s(k)$ является узкополосным. Соотношение (4) отображает основную особенность рассеяния на такой неоднородности, т. е. его существенную частотную зависимость, которая проявляется как с энергетической, так и с информационной стороны.

Изменение метеопараметров по трассе зондирования приводит к деформации (растяжению или сжатию) звуковой волны вдоль координаты r , а следовательно, к перемещению $S_s(k)$ по оси частот k , вследствие чего максимумы пространственных спектров взаимодействующих сигналов не совпадают (см. рис.), а диапазон перекрытия спектров сужается. Амплитуда результирующего рассеянного сигнала при этом уменьшается. Представленные на рисунке спектры процессов $e(r)$ и $s(r)$ изображены один над другим, причем, ось пространственных звуковых частот для наглядности сжата в два раза в соответствии с условием Брэгга $k'_e = k'_s / 2$.

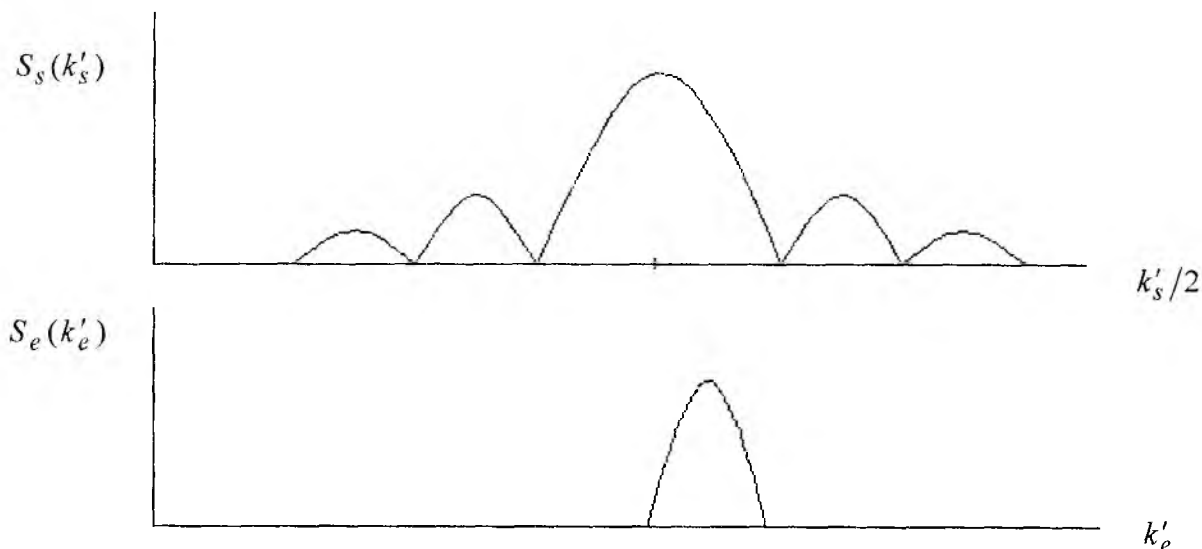


Рис.

Если максимумы спектров $S_e(k/2)$ и $S_s(k)$ не совпадают, т. е., как говорят, наблюдается расстройка по Брэггу, то максимум пространственного спектра $S_y(k/2)$ смещается дополнительно на

величину Δk вследствие неравномерности и несимметричности функции $S_s(k)$ в диапазоне перекрытия спектров. Это приводит к смещению максимума временного спектра рассеянного сигнала на величину $\Delta\omega = c\Delta k$ (где c – скорость распространения электромагнитных волн) и отличию частотного сдвига от чисто доплеровского. Можно рассматривать также смещение центра тяжести $S_p(k/2)$. Следует отметить, что при переходе от пространственных к временным частотам даже очень малое смещение Δk ввиду большого значения c трансформируется в ощутимую разность $\Delta\omega$. $\Delta\omega$ представляет собой систематическую ошибку при определении скорости звука по доплеровскому сдвигу частоты, наличие которой приводит к существенным погрешностям в определении температуры. При определенных условиях пространственный, а следовательно, и временной спектры рассеянного сигнала будут двумодовыми, что ранее отмечалось в работах по зондированию атмосферы.

Проиллюстрируем возможности физической интерпретации известных в литературе результатов анализа погрешностей оценки температуры системами радиоакустического зондирования (РАЗ) с использованием предложенной модели рассеяния. Запишем формулу для частоты рассеянного на звуке радиосигнала, полученную в [2,3] в результате строгого решения волновой задачи при гауссовых формах огибающих звукового импульса и пространственного окна:

$$\omega_p = \omega - 2k_e c_s + q c_s l_s / (l_p^2 + l_s^2), \quad (5)$$

где ω и $k_e = 2\pi/\lambda_s$ – частота и волновое число излучаемых электромагнитных колебаний; $l_s = c_s \tau_s$ – пространственная протяженность акустического волнового пакета (АВП); $q = 2k_e - k_s$ – параметр расстройки условия Брэгга; $k_s = 2\pi/\lambda_s$ – волновое число для звука; l_p – продольный размер области (пространственного окна), из которой возможен прием рассеянного излучения или, другими словами, размер области пересечения диаграмм направленности передатчика и приемника. Поскольку формула (5) получена для бистатической схемы зондирования и непрерывного радиосигнала, характеризующегося большим значением пространственной протяженности l_e , то роль l_e здесь выполняет параметр l_p .

При $q = 0$ частота рассеянного сигнала совпадает с доплеровской частотой ω_g , а доплеровский сдвиг $\Omega_g = 2k_e c_s$ равен частоте звука Ω . При наличии расстройки (когда $q \neq 0$) третий член в (5) описывает ошибку частотного сдвига $\Delta\omega$, зависящую от параметров l_p и l_s . С увеличением l_p и уменьшением l_s значение $\Delta\omega$ уменьшается. При $l_p \rightarrow \infty$ ошибка $\Delta\omega$ стремится к нулю.

Данные результаты получают четкую физическую интерпретацию в пространстве волновых частот, где уменьшение l_s приводит к расширению пространственного спектра АВП и уменьшению “скошенности” спектра в области перекрытия спектров взаимодействующих сигналов. Увеличение l_p (l_e) сопровождается сужением спектра радиосигнала и, соответственно, уменьшением влияния “скошенности” спектра АВП. При l_p (l_e) $\rightarrow \infty$ пространственный спектр радиосигнала стремится к δ -функции и ошибка $\Delta\omega \rightarrow 0$. Ширина спектральной линии рассеянного сигнала, как следует из предложенного рассмотрения рассеяния, также будет определяться значениями пространственных параметров l_p, l_e, l_s , что подтверждается результатами строгого решения соответствующих волновых уравнений [2,3].

При существовании в атмосфере высотного градиента температуры (если предположить, что градиент является постоянным) акустическая решетка превращается в линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал [4,5], имеющий, как известно, прямоугольный амплитудный и квадратичный фазовый спектры. Влияние последнего приводит к дополнительному изменению формы рассеянного сигнала. Заметим, что в [3], вследствие неправильного физического толкования параметра l_p , получены завышенные значения погрешностей оценки температуры, вызванных влиянием градиента.

Если под воздействием метеопараметров спектр $S_s(k)$ смещается настолько, что спектры $S_e(k/2)$ и $S_s(k)$ в пространстве волновых чисел не перекрываются вовсе, то такие сигналы в соответствии с (3) становятся ортогональными, т.е. акустический сигнал в этом случае полностью прозрачен для радиосигнала. Совпадения максимумов спектров $S_e(k/2)$ и $S_s(k)$ на практике достигают адаптивным изменением частот зондирующих акустического и (или) электромагнитного сигналов.

Соотношения (1) и (3) отображают также изменения формы зондирующего радиосигнала при рассеянии. Увеличению длительности рассеянного радиосигнала вследствие конечной протяженности АВП, определяемому (1), соответствует сужение его пространственного спектра, как следует из (3).

Представление процесса рассеяния в области пространственных спектров наглядно отображает также особенности взаимодействия различных видов радио и акустических зондирующих сигналов. Для иллюстрации рассуждений будем использовать рисунок.

Если используются импульсный акустический и непрерывный электромагнитный сигналы, то спектр $S_e(k/2)$ стягивается в δ – функцию. Условие пространственного резонанса «выбирает» из совокупности бесконечных бегущих плоских волн, суперпозиция которых составляет акустический пакет, единственную спектральную компоненту, отвечающую условию Брэгга.

Если радиосигнал будет иметь конечную длительность (пространственную протяженность), а акустическое излучение – непрерывное, то на рисунке спектр $S_s(k)$ будет представлен δ – функцией. В этом случае звуковая волна с частотой k_s самостоятельно выделяет рассеиваемую пространственную гармонику, соответствующую условию брэгговского резонанса (если, конечно, таковая окажется, т.е. если спектры перекрываются).

Показателен случай, когда короткий радиоимпульс (например, наносекундной длительности) рассеивается на продолжительной акустической посылке. При этом $S_s(k)$ на рис. будет выглядеть в виде δ – функции, а $S_e(k/2)$ значительно расширится. Амплитуда рассеянного радиосигнала слабо зависит от изменения метеопараметров, вызывающих перемещение $S_s(k)$ по оси частот, а вот смещение максимума частотного спектра рассеянного сигнала по абсолютной величине может быть значительно большим, чем привычное значение доплеровского сдвига. Величина сдвига может достигать значений порядка ширины спектра зондирующего импульса $\Delta k \sim 2\pi/l_e$, $\Delta\omega \sim 2\pi c/l_e$, т.е. единиц, десятков, сотен мегагерц в зависимости от длительности радиосигнала.

Аналогично представляется рассеяние на звуке при использовании зондирующих электромагнитного и акустического сигналов в виде периодических последовательностей импульсов, имеющих дискретный спектр, в том числе квазинепрерывного зондирующего радиосигнала.

Изменения при рассеянии формы и параметров зондирующих сигналов акустических и радиоакустических систем по оси запаздывания и по оси частот определяются характеристиками и протяженностью области рассеяния в направлении зондирования, как следует из выражений (1) и (3).

В соответствии с этим становится возможной целенаправленная деформация рассеянного сигнала с целью достижения его требуемой формы путем соответствующего подбора (оптимизации) форм и параметров зондирующего сигнала и области рассеяния. В радиоакустических системах область рассеяния, как правило, задается акустическим сигналом, поэтому здесь подбираются характеристики зондирующих электромагнитного и акустического сигналов. Такие исследования представляют определенный теоретический интерес и в ряде случаев могут обеспечить необходимый практический результат.

Проиллюстрируем возможности синтеза необходимого вида сигнала, приходящего на вход приемника в акустических системах зондирования атмосферы. Рассмотрим бистатистическую схему акустического зондирования [6]. В таких системах, как правило, используется непрерывный зондирующий сигнал, позволяющий повысить энергетический потенциал системы, но он создает помехи на входах приемников при приеме рассеянных сигналов в виде прямого зондирующего сигнала передатчика.

Влияние паразитного сигнала передатчика на работу приемных устройств можно устранить, если излучать импульсный акустический сигнал, имеющий малую скважность, с длительностью τ и периодом T , а принимать рассеянное излучение импульсами с длительностью $T - \tau$ и периодом T . Причем, прием в каждой точке пространства следует осуществлять тогда, когда в этой точке отсутствует прямой сигнал передатчика.

Такой режим работы становится возможным вследствие того, что рассеяние импульсных сигналов на целях, протяженных в направлении вектора рассеяния, сопровождается увеличением длительности рассеянных сигналов по сравнению с зондирующими импульсами, а при определенных условиях импульсный зондирующий сигнал при рассеянии превращается в непрерывное колебание. Рассмотрим более подробно эти условия, используя пространственные и временные характеристики сигналов. Изменения формы сигнала при рассеянии могут быть отображены также в области волновых чисел с использованием пространственных спектров сигналов и области рассеяния.

Если протяженность по вертикали l_v области рассеяния $l_v > \frac{c_s \tau}{2} \sin \frac{\theta}{2}$, где θ – угол рассеяния, то при использовании прямоугольного зондирующего импульса рассеянный сигнал будет иметь трапециевидную форму. Длительность плоской части сигнала

$$\tau_p = \frac{2l_v}{c_s \sin(\theta/2)} - \tau,$$

длительности фронтов – τ , а протяженность сигнала на уровне 0,5 составит

$$\tau_{0,5} = \frac{2l_v}{c_s \sin(\theta/2)}.$$

Если выбрать период T следования зондирующих импульсов $T \leq \tau_{0,5}$, то рассеянные сигналы перекрываются во времени и образуют непрерывное колебание. Так, при $c_s = 340$ м/с, $l_v = 15$ м, $\theta = 150^\circ$, $\tau = 10$ мс, имеем $\tau_p = 81$ мс, а $\tau_{0,5} = 91$ мс. Следовательно, при $T \leq 91$ мс рассеянный сигнал будет непрерывным.

Осуществляя прием сигнала в промежутках времени, когда зондирующий сигнал отсутствует в точке приема, полностью устраняем влияние последнего на процесс обработки рассеянного сигнала и измерения его информативных параметров. Способы обработки и измерения параметров импульсных сигналов, имеющих малую скважность, известны [7].

Анализ энергетических соотношений показывает, что при использовании данного способа зондирования (по сравнению с использованием непрерывного зондирующего сигнала) следует ожидать увеличения отношения сигнал-шум на входе приемников на несколько порядков, что существенно повышает качественные показатели системы.

Таким образом, представление процесса рассеяния волн на неоднородностях атмосферы в пространстве волновых чисел с использованием понятия взаимного энергетического пространственного спектра значительно облегчает анализ характеристик зондирующих и рассеянных сигналов систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы

Полученные результаты позволяют объяснить особенности взаимодействия различных видов электромагнитных и акустических сигналов, а также специфические погрешности оценивания температуры, свойственные методу РАЗ. Предложенная модель достаточно проста, конструктивна, адекватно описывает многие особенности рассеяния волн на решетках и может использоваться при решении задач, имеющих место при синтезе и анализе систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы.

Список литературы: 1. Карташов В.М., Сакало С.Н. Модель рассеяния волн на неоднородностях атмосферы // Радиотехника и информатика. 2001. №2 (в печати). 2. Гурвич А.С., Кон А.И., Татарский В.И. Рассеяние электромагнитных волн на звуке в связи с задачами зондирования атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, №4. С. 451-472. 3. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200с. 4. Steinhagen H., Neisser J. Improvement of the Altitude coverage of Temperature Measurements using RASS // Proc. 9 Int. Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere. 1996. P. 329-334. 5. 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. 6. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации / Под ред. Г.Г. Щукина. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 321 с. 7. Справочник по радиолокации в 4-х т. / Под ред. М. Скольника. М.: Сов. радио, 1979. Т. 3. 528 с.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 4.04.2001