

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА, РАССЕЯННОГО АКУСТИЧЕСКИМ ВОЛНОВЫМ ПАКЕТОМ

Распространенные в радиолокации алгоритмы обработки колебаний строятся в предположении, что форма сигнала при отражении от цели не изменяется, а изменяются лишь значения его параметров, в которые и закладывается полезная информация. Оптимальной в этом случае является обработка принимаемых сигналов с использованием корреляторов или фильтров, согласованных с излучаемым сигналом, которые позволяют решать задачи обнаружения, оценивания параметров, разрешения [1, 2, 3].

Аналогичные процедуры обработки реализуются и в радиоакустических станциях (РАС). Однако в радиоакустическом локационном канале, как показано [4], наблюдается изменение формы излучаемых колебаний, в силу чего принимаемый радиосигнал существенно отличается от излучаемого или опорного, если при обработке используются корреляторы. Вследствие этого результаты измерений, например, доплеровской частоты в расдарах, содержат систематическую погрешность, что характерно как для простых, так и сложных звуковых импульсов.

Несущественным изменение формы сигнала в канале можно считать только при использовании простых акустических импульсов и выполненном условии Брэгга $q = 0$ (q – параметр расстройки условия Брэгга), когда имеет место искажение огибающей без нарушения тонкой внутренней структуры колебания. Поэтому при $q = 0$ используемые в системах РАЗ традиционные устройства обработки, предназначенные для измерения доплеровской частоты, не дают специфической систематической погрешности оценивания скорости звука, обусловленной искажениями сигнала в канале; если же $q \neq 0$, такая ошибка имеет место и возрастает с увеличением значения параметра q . Параметр расстройки определяется как $q = 2k_s - k_e$, где k_s – волновое число для звука; k_e – волновое число радиоволны. При распространении звуковой волны в атмосфере изменяется величина k_s , а следовательно и q .

На практике процесс выполнения измерений при излучении простых звуковых импульсов осуществляют, как правило, используя подстройку частоты акустического или электромагнитного сигналов под условие Брэгга, что существенно усложняет систему и процесс зондирования. Выполняют измерения и без частотной адаптации системы к метеорологической обстановке по трассе распространения волн, но систематические ошибки оценивания метеопараметров получаются в этом случае очень значительными.

Таким образом, как следует из изложенного, применяемые в расдарах алгоритмы обработка сигналов не адекватны процессам, происходящим в локационном канале. Используя полученные в работе [4] результаты, оказывается возможным создавать алгоритмы обработки сигналов радиоакустических систем, построенные с учетом преобразования радиоволны в канале и позволяющие осуществлять качественные измерения параметров атмосферы не только при выполненном условии Брэгга, но и при $q \neq 0$, а также при излучении сложных звуковых импульсов.

Уравнение наблюдения или принимаемое рассеянное поле в задаче радиоакустического зондирования представим в следующем общем виде:

$$E_1(\vec{r}, t) = \Re \left[E(\vec{r}, t), S(\vec{r}, t) \vec{\Theta}(\vec{r}, t) \right] + n(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где $E(\vec{r}, t)$ – комплексная огибающая электромагнитного сигнала; $S(\vec{r}, t)$ – комплексная огибающая акустического сигнала; $\vec{\Theta}(\vec{r}, t)$ – вектор параметров атмосферы; \Re – оператор преобразования сигналов в канале (оператор рассеяния); $n(\vec{r}, t)$ – поле аддитивных помех;

\vec{r} – радиус вектор точки пространства. На выходе приемной антенны принимаемый процесс является функцией времени t :

$$U_1(t) = U_{ES}(t, \vec{\Theta}) + n(t), \quad (2)$$

где U_{ES} – рассеянный (полезный) сигнал на выходе антенны при заданных функциях E и S .

При зондировании атмосферы с целью измерения температуры (а большинство известных расдаров решают именно эту задачу) вектор параметров среды $\vec{\Theta}$ можно представить единой интегральной характеристикой c_s – скоростью звука, зависящей от температуры, скорости ветра, давления, влажности и т.д. С другой стороны, c_s является параметром движения цели – акустического волнового пакета.

Рассмотрим задачу оценки величины c_s – параметра среды и объекта, постоянного на интервале времени Δt анализа входного колебания и принадлежащего континуальному множеству возможных значений $c_s \in C$.

Из теории радиосистем известно [1, 2, 3], что синтез оптимального математического оператора измерительной системы и формирование оптимального решения основываются на использовании функции правдоподобия, которую применительно к данной задаче можно записать, как $w(U_1/c_s)$. Возможно использование и некоторых других функций, монотонно связанных с $w(U_1/c_s)$, которые называют достаточными статистиками. Достаточная статистика $X(U_1, c_s)$ включает в себя всю информацию об измеряемой величине, которая содержится в принимаемом колебании $U_1(t)$. Статистика X может быть использована при формировании различных решений – обнаружения, оценивания и т. д., однако вынесение решения приводит к «разрушению» информации, содержащейся в X , и полученный результат уже не включает всех сведений, имеющихся в $U_1(t)$ и X .

Задача устройств обработки расдаров должна сводиться, таким образом, к формированию достаточной статистики $X(U_1, c_s)$ на интервале возможных значений $C: c_s \in (c_{s \min} - c_{s \max})$ и нахождению значения c_s , соответствующего максимуму функции $X(U_1, c_s)$. Оптимальным выходным эффектом может выступать модульное значение комплексного корреляционного интеграла $Q(c_s)$

$$Q(c_s) = \left| \int U_1(t) U_{ES}(t, c_s) dt \right|, \quad (3)$$

где $U_{ES}(t, c_s)$ – опорный сигнал. Значения c_s связаны функциональной зависимостью с k_s : $k_s = 2\pi f_s / c_s$, а следовательно, с параметром расстройки условия Брэгга $q = 2k_s - k_e$. Для заданных значений q и c_s вид опорного сигнала (или его комплексная огибающая) может быть определен в соответствии с выражением

$$U(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jq r'} dr', \quad (4)$$

где r' – продольная пространственная координата; r – смещение сигналов по координате r' . Если r представить в (4) как $r = ct$, где c – скорость распространения электромагнитных волн, то (4) становится функцией времени t .

С целью подтверждения возможности применения известных результатов [1, 2, 3] к рассматриваемой ситуации заметим, что в процессе их получения на форму сигнала не накладывалось никаких ограничений кроме того, что при приеме эта форма должна быть известна. Помеха $n(t)$ в (2) должна представлять собой гауссовский случайный процесс с равномерной

спектральной плотностью в пределах полосы пропускания приемника. Это предположение с достаточной точностью выполняется для радиоакустических систем, поскольку внешние помехи не оказывают существенного влияния на эффективность их функционирования, а основное негативное влияние оказывают внутренние шумы приемника.

Таким образом, рассматриваемая процедура оценивания заключается в вычислении совокупности значений корреляционного интеграла (3) в n точках, позволяющих воспроизвести искомую кривую $Q(c_s)$ с достаточной точностью (где $n = (c_{\max} - c_{\min}) / \Delta c$), нахождению максимума функции $Q(c_s)$ на анализируемом интервале и значения c_s , соответствующего найденному максимуму.

Оценки c_s , полученные в соответствии с предложенным алгоритмом, свободны от систематических погрешностей, а случайные, нормальные ошибки измерений достаточно хорошо описываются, как показывал анализ, известным соотношением [3]

$$\sigma_{c_s}^2 = \frac{c}{2f_e} \frac{1}{\mu^2 T_l^2},$$

где μ^2 – отношение сигнал/шум по мощности; T_l – эффективная длительность радиосигнала.

В случае применения простых звуковых колебаний и предложенного алгоритма оценивания необходимость настройки на условие Брэгга отпадает. Если вследствие значительного изменения метеопараметров с высотой будет наблюдаться выход системы за пределы «полосы рассеяния» АВП и возникает необходимость в повышении отношения сигнал/шум, то это может быть достигнуто изменением частоты одного из сигналов (на практике более просто это реализуется с помощью звука). Такая техническая задача уже не представляет трудностей и может быть решена использованием дискретной сетки фиксированных несущих частот.

На практике данный алгоритм может быть реализован в различных вариантах, например, по параллельной или последовательной схемам.

Существенное отличие предложенного алгоритма оценивания от широко распространенных на практике (как в РЛС, так и РАС) устройств измерения параметров заключается в опорном сигнале. В данном случае опорные колебания в различных точках диапазона C отличаются видом, формой, а не значением параметра, как это принято, например частоты. Только в точке, где значение параметра расстройки $q = 0$, опорный сигнал по форме совпадает с излученным.

Система, реализующая такой метод обработки, может называться доплеровской только с некоторыми оговорками, поскольку измерение собственно доплеровской частоты здесь не производится. Амплитудные и фазовые измерения для сигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом, как и его обнаружение, также должны выполняться с учетом описанных преобразований в канале. Классические радиолокационные алгоритмы обработки – обнаружения, оценивания параметров – являются «мельницей» для входного сигнала РАС, разрушающей либо существенно искажающей содержащуюся в нем полезную информацию о состоянии атмосферы.

Список литературы: 1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с. 2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с. 3. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов. М.: Радио и связь, 1984. 246 с. 4. Карташов В.М. Анализ зондирующих радиоакустических сигналов с использованием тел рассеяния // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2002. Вып. 124. С. 95 – 99.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.12.2002