

Теоретические основы и моделирование корреляционного метода обнаружения источников шума

(часть 1)

Владимир Болдырев (Краснодарский край)

В статье анализируется корреляционный метод обнаружения источников шума в воде, воздухе и на суше, перспективного для современных поисковых систем. Анализируются энергетические соотношения при корреляционной обработке данных от двух датчиков (акселерометров, гидрофонов или микрофонов).

ВВЕДЕНИЕ

Современная электроника достигла такого уровня развития, что мы уже не удивляемся возможности поговорить с друзьями, находящимися на другой стороне Земли. Не удивляемся тому, что играющийся на другом континенте футбольный матч телевидение показывает нам в прямом эфире. Большинство фантастических событий, происходящих в сказках, сегодня стали реальностью благодаря современной электронике и различным методикам. Возможности одной из методик – корреляционного метода обнаружения источника шума – будут продемонстрированы в данной статье.

Однажды произошёл такой случай. Человек заблудился в тайге и месяц безуспешно блуждал по ней. Спасти его помог звук «колота» (огромная деревянная кувалда), сбивающего кедровые шишки с могучих деревьев, т.к. звук ударов разносился на десятки километров вокруг. Но в данной статье речь пойдёт не об этом обычном методе обнаружения источника, когда амплитуда сигнала превышает уровень шума при приёме. Речь пойдёт о методе, когда уровень сигнала в сотни и тысячи раз слабее шума на входе приёмника. Уверенно выделить такой слабый сигнал можно корреляционным методом, когда по двум или нескольким каналам приёма

отыскивается один и тот же сигнал, обладающий в каждом из каналов одинаковыми корреляционными свойствами (проще говоря, имеющий одинаковую форму). Если входные датчики (акселерометры, гидрофоны или микрофоны) каждого из каналов разнесены в пространстве друг от друга, то по задержке прихода полезного сигнала можно в принципе определить дальность и даже направление на источник звука.

Самым удивительным свойством корреляционного метода является возможность обнаружить исключительно слабый сигнал на огромных расстояниях. Причём при увеличении длительности сигнала и длительности его обработки можно значительно увеличить дальность обнаружения (в идеале до бесконечности при бесконечно длительном сигнале).

Попробуем же детально разобраться в основополагающих закономерностях этого метода и определить параметры, необходимые для проектирования системы, реализующей корреляционный метод обнаружения источника шума.

Постановка задачи

Источник шумового сигнала, как правило, имеет неизвестные параметры по спектру, корреляционным свойствам, времени появления, длительности и форме огибающей

шумового сигнала. Это могут быть шумы механических устройств или утечек из трубопроводов, сейсмические колебания или шаги людей по поверхности. Такая неопределённость значительно усложняет задачу теоретического анализа по сравнению с вариантами выделения сигнала с известными параметрами, когда сигнал сначала формируется, излучается, а потом принимается и проходит корреляционную обработку относительно известной модели сформированного сигнала. Поэтому результаты исследований при известных сигналах, которые получены в большинстве теоретических работ [1], посвящённых корреляционным методам обработки сигналов, лишь частично могут быть использованы для проектирования систем обнаружения неизвестных источников шумового сигнала.

Наряду с неизвестными параметрами источника, нередко недостаточно полно известны параметры распространения звука в сложной среде. Кроме неопределённости параметров источника и среды, всё усложняется необходимостью рационального выбора параметров, связанных с датчиками, внешними помехами, усилителями, аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и с цифровой корреляционной обработкой данных.

Такая неопределённость исходных данных является характерной чертой проектирования так называемых «больших сложных систем». Другой особенностью этих систем является большое количество факторов и разнообразие их природы, влияющее на конечный результат функционирования сис-

тем. С этими особенностями проектирования встретились разработчики космических систем связи, навигации и локации, в результате чего были выработаны принципы, позволяющие преодолевать упомянутые проблемы множественной неопределённости и многофакторности.

Некоторые принципы проектирования «больших сложных систем» могут быть использованы и при теоретических исследованиях системы обнаружения источников шума.

Создание универсальной модели обнаружения источника шумового сигнала для любой среды весьма громоздко. Более рационален подход создания разных моделей для каждой из сред. При этом различие может коснуться геометрии и особенностей распространения в среде. Общие принципы построения этих моделей могут быть схожими.

В настоящей статье приведены исследования корреляционного метода обнаружения источников шумового сигнала и пример моделирования на протяжённой линейной структуре, например, на трубопроводе. Насущность контроля и обнаружения утечек из трубопроводов понятна и не требует пояснений.

Метод решения

В условиях неопределённости при системном подходе целесообразно разделять канал, по которому передаётся полезный сигнал, на относительно «независимые» фрагменты, учитывая при этом необходимость решения общей задачи. Для каждого из фрагментов канала должен быть найден комплексный параметр (желательно, один).

Например, для источника сигнала это может быть произведение энергии излучённого сигнала на коэффициент усиления излучающей антенны в направлении на приёмник. Назовём его условно *потенциалом излучения*. Физический смысл потенциала излучения состоит в том, что его увеличение, например, за счёт улучшения направленности, приводит к пропорциональному увеличению уровня сигнала в месте приёма.

Для среды распространения – это комплексный *параметр ослабления* сигнала в среде с учётом её частот-

ных свойств, направления, дальности, поглощения, рассеяния и аномалий распространения.

Для приёмной части – это комплексный параметр, тесно связанный с достижимым отношением сигнал/шум и учитывающий направленность на излучатель, внешние помехи на месте приёма, собственные шумы аппаратуры и особенности обработки сигнала. Назовём его условно *потенциалом приёма*. Физический смысл потенциала приёма состоит в том, что его увеличение, например, за счёт улучшения направленности, приводит к пропорциональному увеличению принимаемого сигнала и достижимого отношения сигнал/шум.

Поскольку параметры источника шумового сигнала неопределённые и не могут быть учтены в явном виде, полезно ввести комплексный параметр *потенциала обнаружения* как произведения потенциала приёма и параметра ослабления в среде. Физический смысл потенциала обнаружения состоит в том, что его увеличение, например, за счёт улучшения направленности при приёме или уменьшения собственных шумов приёмной аппаратуры и ослабления в среде, приводит к пропорциональному увеличению принимаемого сигнала и достижимого отношения сигнал/шум. Этот комплексный параметр характеризует потенциальную способность системы обнаруживать сигнал. Чем он выше, тем более слабый сигнал может быть обнаружен или тем больше расстояние, на котором может быть обнаружен тот же сигнал. Потенциал обнаружения включает в себя зависимость ослабления среды от расстояния, и поэтому из потенциала может быть определена дальность обнаружения сигнала.

Обратите внимание, что потенциалы приёма и обнаружения не требуют конкретизации потенциала излучения, но требуют учитывать следующие положения:

- ширина спектра при приёме может значительно отличаться от ширины спектра шумового сигнала источника (иногда в несколько раз);
- длительность приёма может значительно отличаться от длительности сигнала (иногда в несколько раз).

Поскольку параметры источника сигнала неизвестны, а основной задачей является увеличение дальности обнаружения, естественно полагать, что в приёмной части аппаратуры целесообразно использовать высококачественные малошумящие усилители и АЦП с широким динамическим диапазоном [2 – 3], что позволяет создать систему, обнаруживающую наименее слабые источники на наибольшем расстоянии, достижимом на современном этапе развития электроники.

При анализе рассматриваемой системы обнаружения всё же потребуются конкретизировать тип шумового сигнала источника, поскольку без этого невозможно определить параметры обработки и отношение сигнал/шум на выходе коррелятора при приёме. Поэтому принимается следующее условное положение: источник шума излучает так называемый сложный сигнал, произведение длительности которого на ширину его спектра частот значительно больше единицы. Типичными сложными сигналами являются «розовый» шум случайного происхождения или сигнал с линейной частотной модуляцией с равномерными спектрами в ограниченной полосе частот и постоянными интенсивностями во времени. Такие сигналы имеют узкий пик функции неопределённости и взаимокорреляционной функции (ВКФ) и позволяют достичь наилучшего разрешения по дальности обнаружения. Реально источник может излучать сигнал с корреляционными параметрами, несколько худшими, чем у упомянутых сигналов, т.е. дальнейшее исследование и моделирование дают максимально благоприятные оценки.

Следует подчеркнуть, что простые сигналы, например, тональный сигнал на фиксированной частоте, имеют широкий пик ВКФ по длительности, превышающий длительность сигнала почти в 2 раза, и поэтому практически неэффективны при корреляционном методе обнаружения. Для таких сигналов больше подходит обычный амплитудный метод обнаружения, когда амплитуда сигнала превышает уровень шума при приёме.

Такой подход позволяет начать исследование системы обнаружения не

с параметров источника, а с приёмной части, поскольку достижимые на современном этапе параметры достаточно хорошо известны специалистам по проектированию приёмной аппаратуры. Затем переходят к учёту среды и лишь на заключительном этапе – к определению дальности обнаружения гипотетических источников.

Таким методом может быть решена поставленная задача по выявлению целого класса обнаруживаемых источников, оценены их параметры и расстояние, на котором они могут быть обнаружены.

Принципы, положенные в основу исследований корреляционного метода обнаружения

Для проектантов электронных систем с простыми сигналами специфической корреляционных методов приёма сигналов является необходимость перехода от привычных и понятных амплитудных или эффективных значений напряжения и мощности к понятию энергии сигнала и шумов. То есть для корреляционных методов важны не только напряжение или мощность, но и время действия сигналов и шумов. Это не значит, что при простых сигналах энергия не является основополагающим фактором при выделении сигналов. Но в обычно применяемых формулах расчёта каналов этот параметр скрыт за параметрами напряжения, мощности, полосы пропускания и длительности импульсов простых и импульсных сигналов.

Такая специфика проистекает из особенностей операции «сжатия» сложного сигнала по времени (в некоторых ситуациях и по спектру), когда в ходе корреляционной обработки распределённый по времени длительный сигнал на входе коррелятора сжимается до короткого простого импульса на его выходе. Мощность импульса на выходе при этом возрастает в сотни и тысячи раз по сравнению с мощностью на входе коррелятора. Это происходит строго в соответствии с законом сохранения энергии, при котором энергия сигнала на входе коррелятора должна быть равна энергии на его выходе.

Выразим энергию сигнала на входе E_{in} и на выходе E_{out} согласованного фильтра, которым является корреля-

тор, через мощности P_{in} и P_{out} и длительности T и T_{out} сигнала на входе и выходе в виде [1]: $E_{in} = P_{in}T$, $E_{out} = P_{out}T_{out}$. Так как справедлив закон сохранения энергии, то $P_{out}/P_{in} = T/T_{out}$.

При сжатии сигнала по времени без изменения ширины полосы частот F сжатый импульс на выходе будет простым, для которого произведение ширины полосы сигнала F на его длительность T_{out} сравнимо с единицей, что характерно для простых сигналов. Тогда, умножив и разделив полученное выражение на F , получим:

$$P_{out}/P_{in} = TF/T_{out}F = TF/1 = TF = B. \quad (1)$$

Видно, что мощность на выходе согласованного фильтра возрастает в TF раз. Произведение $B = TF$ называется *базой сигнала*, и для «хороших» сложных сигналов оно может достигать сотен и тысяч единиц, а при «плохих» приближаться к единице, т.е. приближаться к базе простых сигналов. Это позволяет при малых мощностях источника «хороших» сложных сигналов получить большое отношение сигнал/шум после приёма и корреляционной обработки при соответствующем увеличении длительности и ширины полосы частот, занимаемой сигналом источника. Предположим, сложный сигнал имеет длительность одну секунду и ширину полосы частот 5000 Гц. Тогда база этого сигнала составит величину $B = TF = 1 \times 5000 = 5000$ единиц – во столько раз увеличивается мощность на выходе коррелятора по сравнению с мощностью на его входе.

Следует подчеркнуть, что при уверенном приёме с большим отношением сигнал/шум на выходе коррелятора для сложных сигналов типичное отношение сигнал/шум на входе приёмника может быть в сотни и тысячи раз меньше единицы, т.е. сложные сигналы могут быть скрыты глубоко в шумах.

Однако в случае источника сигнала с неизвестными параметрами приходится, как указывалось ранее, расширять полосу частот при приёме, чтобы обеспечить приём любого возможного сигнала не только с желаемой максимальной, но и с меньшей шириной полосы. Аналогично приходится увеличивать и

длительность при приёме, чтобы сохранить вероятность приёма наиболее длительного сигнала, поскольку большая длительность увеличивает дальность обнаружения. То есть возникает ситуация, не характерная для оптимального фильтра (коррелятора) при известных параметрах сигнала. Рассмотрим, что происходит при этом с энергиями сигнала и шумов при неоптимальных условиях приёма.

Шумы и помехи при приёме

Энергия шумов и помех E_{inn} на входе приёмника равна энергии за время приёма $T_{in}P_{inn}$:

$$E_{inn} = T_{in}P_{inn} = T_{in}P_{inn}^2/R,$$

где P_{inn} – эффективная мощность шумов и помех, приведённых к входу приёмника ($Вт$), U_{inn} – эффективное напряжение шумов и помех, приведённых к входу приёмника ($В$), R – эквивалентное сопротивление на входе приёмника ($Ом$).

Под интервалом времени T_{in} здесь понимается длительность одного блока отсчётов данных от АЦП, поступающих на коррелятор для корреляционной обработки.

Предположим, на входе приёмника подключен датчик-акселерометр, имеющий собственную спектральную плотность шума ускорения gn (в единицах Гал/ $\sqrt{Гц}$), т.е. в единицах СГС ускорения см/ c^2 в полосе 1 Гц), а также коэффициент преобразования S (в единицах В/ g , т.е. вольт на Гал).

Кроме того, предположим, что в зоне установки датчика действуют внешние шумы и помехи, в а раз превышающие gn .

Обозначим спектральную плотность напряжения собственного шума усилителя, приведённую к входу приёмника, величиной inn (в единицах В/ $\sqrt{Гц}$).

Ширину полосы частот приёма обозначим как $f_{high} - f_{down}$ (в герцах).

Тогда приведённое к входу приёмника эффективное напряжение шумов и помех в вольтах можно оценить по формуле:

$$(U_{inn})^2 = (f_{high} - f_{down})(1 + a^2)(gnS)^2 + (f_{high} - f_{down})(inn)^2.$$

Пусть коэффициент усиления приёмного тракта по напряжению

от входа приёмника до АЦП составляет K .

Максимальное эффективное синусоидальное напряжение на входе АЦП, при котором начинается ограничение АЦП, обозначим величиной V_{adc} в вольтах, а динамический диапазон АЦП, приведённый к полосе частот приёма $f_{high} - f_{down}$, обозначим величиной D_{adc} в децибелах.

Тогда эффективное напряжение U_{adcn} шумов и помех в вольтах, приведённое к входу АЦП, можно определить по формуле:

$$(U_{adcn})^2 = (f_{high} - f_{down}) \times (1 + a^2)(gnSK)^2 + (f_{high} - f_{down}) \times (innK)^2 + [V_{adc}(10^{-0,05D_{adc}})]^2.$$

Соответственно, суммарная мощность P_n шумов и помех на входе и на выходе коррелятора от двух приёмных трактов двух датчиков составит (на условном сопротивлении R_k):

$$P_n = 2(U_{adcn})^2/R_k,$$

поскольку мощность некоррелированных между собой шумов и помех от двух одинаковых приёмных каналов суммируется (удваивается).

Следует обратить внимание, что мощность некоррелированных шумов и помех на входе коррелятора остаётся примерно равной мощности на его выходе, поскольку при некоррелированности «сжатие» по времени практически отсутствует.

Сигнал при приёме

На каждом из двух входов приёмника энергия E_{ins} шумового сигнала источника за время приёма $T_{прт}$ равна сумме энергий за время существования сигнала T и за время паузы $(T_{прт} - T)$. Но в промежутке $(T_{прт} - T)$ энергия сигнала равна нулю, поскольку длительность сигнала составляет T секунд. Поэтому энергию сигнала на входе приёмника можно представить выражением: $E_{ins} = TP_{ins} = T(U_{ins})^2/R$, где P_{ins} – эффективная мощность сигнала на входе приёмника (Вт), U_{ins} – эффективное напряжение сигнала на входе приёмника (В).

Поскольку величина сигнала, входящего от источника, неизвестна, условно зададим, что сигнал на обоих входах одинаковый по величине и может быть обнаружен, если на вхо-

дах приёмника спектральная плотность сигнала равна суммарной спектральной плотности шумов и помех. Тогда на входе приёмника эффективное напряжение сигнала в вольтах можно оценить по формуле: $(U_{ins})^2 = F(1 + a^2)(gnS)^2 + F(inn)^2$, где F – ширина полосы частот шумового сигнала в герцах. При таком условии эффективное напряжение сигнала в вольтах, приведённое к входу АЦП, можно определить по формуле:

$$(U_{adc})^2 = K^2(U_{ins})^2 + [V_{adc}(10^{-0,05D_{adc}})]^2 \times [F/(f_{high} - f_{down})]$$

или

$$(U_{adcS})^2 = F(1 + a^2)(gnSK)^2 + F(innK)^2 + [V_{adc}(10^{-0,05D_{adc}})]^2[F/(f_{high} - f_{down})].$$

В результате корреляционной обработки мощность сигнала на выходе коррелятора возрастает в $B = TF$ раз, и во столько же раз возрастает $(U_{adcS})^2$, т.е. после коррелятора эффективное напряжение сигнала составляет: $(U_S)^2 = FT(U_{adcS})^2$.

Соответственно, на условном сопротивлении R_k суммарная мощность P_s сигнала на выходе коррелятора от двух приёмных трактов двух датчиков составит:

$$P_s = (U_S)^2/R_k = TF(U_{adcS})^2/R_k.$$

Отношение сигнал/шум на выходе коррелятора

Отношение сигнал/шум на выходе коррелятора равно отношению мощности шумового сигнала источника к мощности шума и помехи на выходе коррелятора:

$$sn = P_s/P_n = TF(U_{adcS})^2/2(U_{adcn})^2$$

или после преобразований

$$sn = 0,5TF^2/(f_{high} - f_{down}) = 0,5B[F/(f_{high} - f_{down})]. \quad (2)$$

Из полученного выражения видно, что сигнал/шум после корреляционной обработки возрастает пропорционально базе сложного сигнала и пропорционально отношению ширины полосы сигнала к полосе приёма. То есть если ширина полосы сигнала совпадает с шириной полосы приёма, то отношение сигнал/шум становится равным половине базы сигнала.

Всё это говорит о больших возможностях корреляционного метода обнаружения источников по сравнению с обычными некорреляционными методами. Например, при базе сигнала $B = 2000$ и совпадении ширины полосы шумового сигнала с полосой приёма преимущество корреляционного метода составляет 1000 раз или 30 дБ по сравнению с некорреляционным методом.

Отличие полученной формулы (2) при неизвестном источнике от формулы (1) при известном сигнале состоит в том, что постоянный множитель 0,5 уменьшает в 2 раза отношение сигнал/шум на выходе коррелятора из-за поступления помех не по одному (при известном сигнале), а по двум одинаковым каналам приёма. Кроме того, расширение ширины полосы частот при приёме $(f_{high} - f_{down})$ по сравнению с реальной полосой F шумового сигнала также пропорционально уменьшает отношение сигнал/шум.

Это подтверждает высказанное в начале статьи положение, что результаты исследований при известных сигналах, которые получены в большинстве теоретических работ [1], посвящённых корреляционным методам обработки сигналов, лишь частично могут быть использованы при проектировании систем обнаружения неизвестных источников шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тузов Г.И. Статистическая теория приёма сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1977.
2. Болдырев В.А. Высококачественный широкополосный приёмный тракт. Моделирование в среде MATLAB. Оптимизация динамического диапазона и чувствительности. Современная электроника. 2006. № 2, 3.
3. Патент на полезную модель № 51751 «Предварительный усилитель для аналого-цифрового преобразователя». Приоритет от 22.08.2005. Патентообладатель ООО «Компания ИНКОМТЕХ». Автор В.А. Болдырев.
4. Барник В., Вендт, Каблов Г.П., Яковлев А.Н. Гидролокационные системы вертикального зондирования дна. Под ред. А.Н. Яковлева. Новосибирск: Изд. Новосибирского унив, 1992.
5. Гидроакустическая энциклопедия. Под общ. ред. В.Н. Тимошенко. Таганрог: Изд. ТРТУ, 1999.

