

Способ адаптивного корреляционного обнаружения

Владимир Бартнев (bartvg@rambler.ru)

Рассматривается задача корреляционного обнаружения флюктуирующих коррелированных сигналов на фоне некоррелированного шума. Один способ корреляционного обнаружения реализуется с помощью умножения и когерентного накопления сигналов с фиксированным порогом. В другом предложенном способе после умножения и когерентного накопления используется адаптивный порог. Расчёт порогов для вероятностей ложных тревог на выходе этих корреляционных обнаружителей для малых выборок наблюдения произведён аналитически, а вероятности правильного обнаружения рассчитаны моделированием в системе MATLAB. Данные результаты в радиолокационной практике получены впервые. На способ адаптивного корреляционного обнаружения получен патент.

Введение

Задача обнаружения коррелированных сигналов на фоне некоррелированных случайных процессов по дискретным выборкам конечного объёма возникает во многих технических приложениях. Известен способ корреляционного обнаружения принимаемых сигналов, когда две выборки наблюдения, принятые на двух разных несущих частотах, перемножаются, их произведение накапливается и модуль накопленного произведения сравнивается с фиксированным порогом [1]. Полученная таким образом оценка модуля межчастотного коэффициента корреляции сравнивается с порогом, на основании чего принимается решение о наличии принятых коррелированных сигналов. Данный способ позволяет осуществлять эффективное обнаружение коррелированных сигналов, тем не менее данно-

му способу свойственен недостаток, проявляющийся в отсутствии стабилизации ложных тревог при изменении уровня шума, на фоне которого производится корреляционное обнаружение.

Для стабилизации ложных тревог при корреляционном обнаружении предлагается способ [2], который включает в себя формирование оценки модуля коэффициента корреляции на основе выборок наблюдений, принятых на двух несущих частотах. Также способ включает сравнение оценок с порогом, который с целью стабилизации ложных тревог при изменении уровня шума делают адаптивным, формируемым как произведение коэффициента, определяющего вероятность ложной тревоги, на суммарную оценку мощности шума на двух несущих

щих частотах. Анализ эффективности подобных устройств, особенно для малых выборок наблюдения и низких вероятностей ложных тревог, с помощью статистического моделирования, затруднителен. Нелинейная операция умножения приводит к изменению вида распределений на выходе этих устройств и существенному усложнению анализа с помощью аналитических выкладок.

Если при нахождении характеристик обнаружения точность расчёта вероятности правильного обнаружения допускает моделирование, то для малых вероятностей ложных тревог точность расчёта с помощью статистического моделирования становится недопустимо низкой. По этой причине и была предпринята попытка впервые найти аналитические выражения для расчёта низких вероятностей ложных тревог для нелинейных устройств с умножителем на входе и адаптивным порогом при использовании малых выборок наблюдений.

Вероятность превышения порога огибающей шума на выходе умножителя с когерентным накопителем и фиксированным порогом

Рассмотрим коррелятор с фиксированным порогом и покажем, что при изменении уровня шума изменяется вероятность ложной тревоги на его выходе. Для расчёта вероятности ложной тревоги для коррелятора с фиксированным порогом воспользуемся следующим выражением (1), где \hat{R} – оценка модуля коэффициента корреляции, N – число накоплений по независимым выборкам.

$$Z1_j = x1_j + iy1_j, Z2_j = x2_j + iy2_j -$$

комплексные выборки сигналов на входе умножителя, разнесённых по частоте в виде аддитивной смеси шума и коррелированного сигнала. Квадратурные компоненты шума имеют нормальное распределение, при этом мощность (дисперсия) равна σ^2 , и среднее распределение, равное 0. Обнаружение сигналов в корреляторе с фиксированным порогом осуществляется путём сравнения полученной оценки модуля

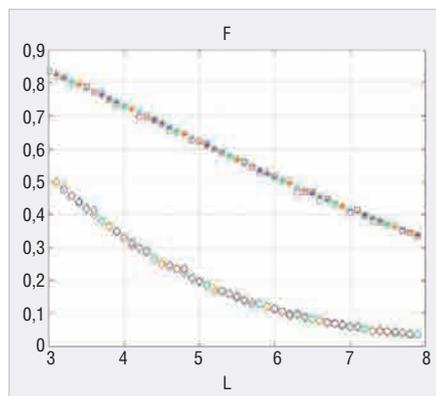


Рис. 1. Вероятность ложной тревоги для корреляционного обнаружения с фиксированным порогом в зависимости от порога L для $N=4$

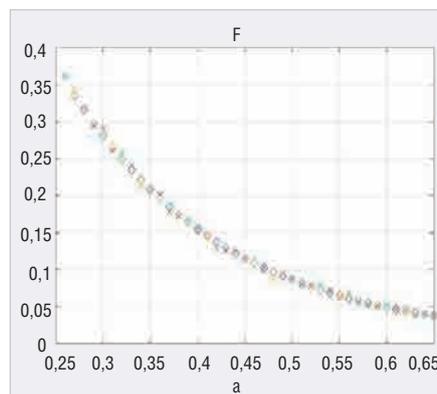


Рис. 2. Вероятность ложной тревоги для предложенного корреляционного обнаружения с адаптивным порогом для $N=4$ в зависимости от константы a , умноженной на суммарную оценку мощности шума

Пороги для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогами при разных ложных тревогах и разных N

N	4	8	16	4	8	16
10 ⁻¹	6,196	8,674	12,2	0,474	0,474	0,20
10 ⁻⁴	15,684	20,093	26,59	2,2045	2,2045	0,5225

коэффициента корреляции с порогом $\hat{R}_{ПОР} > R_{ПОР}$

Покажем, что изменение мощности шума σ^2 приводит к изменению вероятности ложной тревоги. Для этого, применяя методику нахождения вероятности ложной тревоги $F(R_{ПОР})$ из [3], получим выражение (2).

В данное выражение входит гамма-функция $\Gamma(N)$, модифицированная функция Бесселя $K_N(\hat{R}_{ПОР})$ порядка N и мощность шума σ^2 .

Расчёты по формуле (2) для $N=8$, приведённые на рис. 1, показывают, что даже незначительные изменения мощности шума на входе (от 0 до 3 дБ) приводят к заметному росту вероятности ложной тревоги. Для верификации аналитических расчётов на графике имеются результаты и моделирования коррелятора с фиксированным порогом в MATLAB. Совпадение аналитики и моделирования подтверждает отсутствие стабильной вероятности ложной тревоги в корреляторе с фиксированным порогом. Ромбики (моделирование) и кружочки (аналитика) на графиках рисунка 1 соответствуют мощности шума 0 дБ, квадратики (моделирование) и звёздочки (аналитика) – мощности шума 3 дБ.

Вероятность ложной тревоги на выходе умножителя с когерентным накопителем и адаптивным порогом

Чтобы устранить указанный недостаток, предлагается производить дополнительно оценку мощности шума на двух несущих частотах, т.е. $z1$ и $z2$ (см. (3) и (4)).

Суммирование оценок мощности $Z_s = (z1+z2)$ и умножение на коэффициент, определяющий вероятность ложной тревоги α , позволяет сделать порог адаптивным.

Считая независимыми оценки модуля коэффициента корреляции и оценки мощности шума, можно получить выражение для вероятности ложной тревоги предложенного адаптивного коррелятора, см. (5).

Считая, что оценка мощности Z_s имеет распределение χ^2 , вероятность ложной тревоги $F(\alpha)$ примет вид (6).

$$\hat{R} = \left| \sum_{j=1}^N Z1_j * Z2_j^* \right| = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N x1_j * x2_j + y1_j * y2_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N x2_j * y1_j - x1_j * y2_j \right)^2} \tag{1}$$

$$F(R_{ПОР}) = \frac{(R_{ПОР} / \sigma^2)^N K_N(R_{ПОР} / \sigma^2)}{2^{N-1} \Gamma(N)} \tag{2}$$

$$z1 = \sum_{i=1}^{N-1} Re(Z_{1i}) Re(Z_{1i}) + Im(Z_{1i}) Im(Z_{1i}) \tag{3}$$

$$z2 = \sum_{i=1}^{N-1} Re(Z_{2i}) Re(Z_{2i}) + Im(Z_{2i}) Im(Z_{2i}) \tag{4}$$

$$F(\alpha) = \int_0^\infty P(Z_s) dZ_s \int_{\alpha Z_s}^\infty P(R) dR \tag{5}$$

$$F(\alpha) = \int_0^\infty \frac{Z_s^{N-1} e^{-Z_s/2\sigma^2} (\alpha Z_s / \sigma^2)^N K_N(\alpha Z_s / \sigma^2)}{\Gamma(N)(2\sigma^2)^N \Gamma(N)(2)^{N-1}} dZ_s \tag{6}$$

$$F(\alpha) = \sqrt{\pi a} 2^N \Gamma(3N) / 2^{(4N-1)} \Gamma(2N+1/2) \Gamma(N) {}_2F_1\left(\frac{3N+1}{2}, \frac{3N}{2}; 2N+1/2; 1-4\alpha^2\right) \tag{7}$$

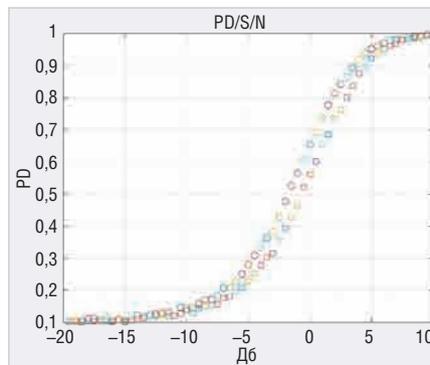


Рис. 3. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогом для N=4 в зависимости от соотношения сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,1 и коэффициента корреляции 0,9

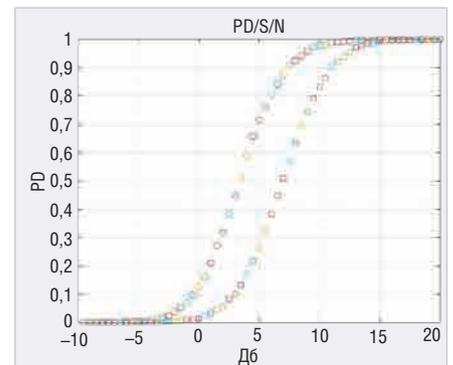


Рис. 4. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогом для N=4 в зависимости от соотношения сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,0001 и коэффициента корреляции 0,9

После взятия интеграла получаем (7), где ${}_2F_1$: гипергеометрическая функция. Полученное выражение (7) говорит о главном – в нём отсутствует мощность шума σ^2 . В таблице указаны пороги для корреляторов с фиксированным (два левых столбца) и (два правых столбца) адаптивным порогами при разных ложных тревогах и разных N .

Характеристики обнаружения сравниваемых способов корреляционного обнаружения

Дальнейший анализ производился не только аналитическим расчётом по полученной формуле, но и для верификации моделированием корреляционного обнаружения с адаптивным порогом в MATLAB.

Результаты аналитических расчётов и моделирования показали хорошее совпадение (см. рис. 2), что позволяет сделать вывод о корректности полученного аналитического выражения (7). Ромбики на графиках рисунка 2 соответствуют аналитике, крестики – моделированию. Главный результат, изменение уровня шума в корреляторе с адаптивным порогом, не влияет на вероятность ложной тревоги.

Коррелятор с адаптивным порогом по эффективности сравнивался с коррелятором с фиксированным порогом расчётом характеристик обнаружения флюктуирующего коррелированного сигнала. Это было сделано с помощью моделирования в системе MATLAB. На рисунках 3–8 приводятся кривые для вероятности правильного обнаружения флюктуирующего сигнала с коэф-

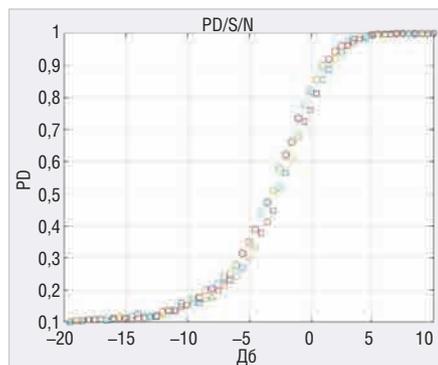


Рис. 5. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогами для N=8 в зависимости от сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,1 и коэффициента корреляции 0,9

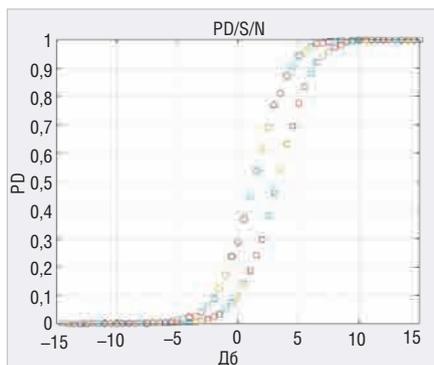


Рис. 6. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогами для N=8 в зависимости от соотношения сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,0001 и коэффициента корреляции 0,9

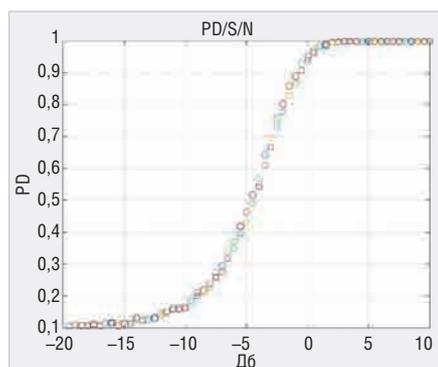


Рис. 7. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогами для N=16 в зависимости от соотношения сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,1 и коэффициента корреляции 0,9

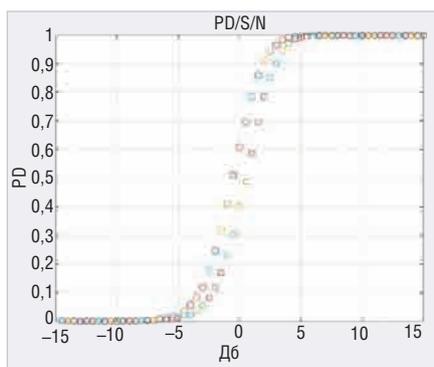


Рис. 8. Вероятность правильного обнаружения PD для корреляторов с фиксированным и адаптивным порогами для N=16 в зависимости от соотношения сигнал/шум (дБ) для вероятности ложной тревоги 0,0001 и коэффициента корреляции 0,9

коэффициентом корреляции 0,9 для двух рассматриваемых устройств при N=4, N=8 и N=16 для вероятности ложной тревоги 0,1 и вероятности ложной тревоги 0,0001. Кружочки на графиках рисунков 3–8 соответствуют коррелятору с

фиксированным порогом, квадратики – коррелятору с адаптивным порогом.

Показано, что эффективность в пороговом сигнале для вероятности правильного обнаружения 0,5 и вероятности ложной тревоги 0,1 и 0,0001

несколько выше у коррелятора без стабилизации ложных тревог, особенно для меньшей вероятности ложной тревоги. Это своего рода плата за инвариантные свойства адаптивного коррелятора к изменениям мощности шума, при этом обеспечивается стабилизация вероятности ложной тревоги на выходе. Следует заметить, что эти потери снижаются при увеличении выборки наблюдений.

Таким образом, проведённое исследование в системе MATLAB полностью подтверждает положительный эффект от применения предложенного коррелятора со стабилизацией ложных тревог. Важно подчеркнуть, что полученное впервые аналитическое выражение для вероятности ложной тревоги адаптивного коррелятора позволит более обстоятельно исследовать его свойства для разных малых выборок наблюдения в широком диапазоне вероятностей ложных тревог.

Литература

1. *Бартенев В. Г.* Новые результаты анализа эффективности устройств корреляционного типа. Современная электроника. 2017. № 1.
2. *Бартенев В. Г.* Патент № 2743027 по заявке № 2019141461. Способ адаптивного обнаружения по корреляционному признаку. 2021. Бюл. № 5.
3. *Бартенев В. Г., Бартенев М. В.* Способ нахождения вероятностных характеристик на выходе нелинейных систем. Цифровая обработка сигналов. 2013. № 4.
4. *Потёмкин В. Г.* Справочник по MATLAB. Анализ и обработка данных. URL: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/chapter8/>. ©

НОВОСТИ МИРА

Осциллограф для монтажа в стойку от RIGOL

Компания RIGOL Technologies объявила о расширении своей технологической платформы UltraVision II. Осциллограф DS8000-R для монтажа в стойку обеспечивает полосу пропускания до 2 ГГц и такую же функциональность что и проверенный осциллограф серии MSO8000 от RIGOL.

Ультратонкая компактная конструкция (высота 1U на 1/2 ширины стойки) позволяет устанавливать два осциллографа DS8000-R на стандартной высоте стойки 1U. Имея в общей сложности восемь каналов с частотой 2 ГГц в 1U стоечного пространства, DS8000-R

обеспечивает непревзойдённую плотность размещения оборудования. Он может управляться локально с помощью монитора HDMI, мыши и клавиатуры, а также удалённо с помощью веб-управления. Тактовая частота дискретизации и синхронизация триггеров позволяют RIGOL предоставлять мощные решения для многоканального высокоскоростного сбора сигналов, таких как сбор переходных событий в физике высоких энергий и автоматизированное тестирование промышленных систем. Цифровые осциллографы DS8000-R имеют четыре аналоговых канала с полосой пропускания 350 МГц, 1 ГГц и 2 ГГц с отлич-

ной частотой дискретизации в реальном времени до 10 Гс/с, глубиной памяти до 500 миллионов точек/с и высокой скоростью захвата сигналов 600 000 фреймов/с. DS8000-R включает в себя цифровой осциллограф, анализатор спектра, генератор произвольной формы сигнала (опционально), цифровой вольтметр, шестизначный счётчик и сумматор, а также анализатор протокола (опционально). DS8000-R может использоваться для мониторинга сигналов в экстремальных условиях окружающей среды с его способностью выдерживать рабочие температуры до -40°C.

www.signalintegrityjournal.com

ChipEXPO-2021

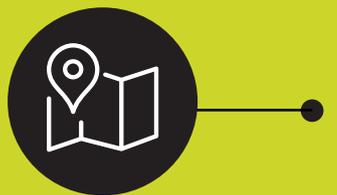
КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ



14-16.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА



СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, включая:
 - экспозицию предприятий, являющихся изготовителями изделий, включенных в единый реестр российской радиоэлектронной продукции (Постановление Правительства РФ №878)
 - экспозицию разработок, созданных в рамках государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы» (Постановление Правительства РФ №109)
 - экспозицию разработок, обеспечивающих выполнение приоритетных национальных проектов.
- Дивизионы кластера «Радиоэлектроника» ГК «Ростех»
- Стартапы в электронике
- Квалифицированные поставщики ЭКБ
- Консорциумы и дизайн-центры по электронике
- Участники конкурса «Золотой Чип»
- Корпорация развития Зеленограда

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО» Москва, 121351, ул. Ярцевская, д.4. Тел.: +7 (495) 221-50-15
E-mail: info@chipexpo.ru <http://www.chipexpo.ru>