

Эффективность алгоритмов объединения квадратурных каналов

Владимир Бартенев (Москва)

Рассмотрены несколько алгоритмов построения обнаружителя сигналов с квадратурной обработкой, включая упрощённые, когда на порог подаётся квадрат огибающей, или сумма модулей сигналов квадратурных каналов, или максимальное значение модуля одной из квадратур. Данные алгоритмы распространены на многоканальное построение обнаружителей сигналов. Сопоставление алгоритмов по характеристикам обнаружения показало, что более простые в реализации алгоритмы по эффективности незначительно уступают оптимальному.

При построении цифровых радиолокационных обнаружителей важнейшей задачей является выбор алгоритмов объединения сигналов квадратурных каналов. Известно [1], что при обнаружении квазидетерминированных сигналов на фоне шума с гауссовым распределением оптимальный алгоритм сводится к выделению огибающей O , сравниваемой с порогом L , который выбирается по заданной вероятности ложной тревоги:

$$O = \sqrt{x^2 + y^2} \geq L(F), \quad (1)$$

где x, y – квадратурные составляющие аддитивной смеси сигнала и шума.

Часто вместо огибающей используют квадрат огибающей, исключая тем самым сложную с точки зрения реализации операцию извлечения квадратного корня:

$$O_1 = x^2 + y^2 \geq L_1(F). \quad (2)$$

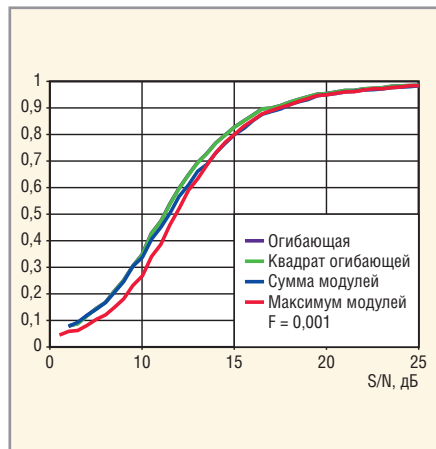


Рис. 1. Результаты расчётов характеристики обнаружения для вероятности ложной тревоги $F = 0,001$

Ещё большего упрощения цифровой реализации алгоритма можно достигнуть, если вместо операции возведения в квадрат сигналов квадратурных каналов перейти к взятию модулей сигналов с последующим их суммированием:

$$O_2 = |x| + |y| \geq L_2(F). \quad (3)$$

И наконец, предельное упрощение даёт алгоритм, выполняющий отбор максимума модулей сигналов квадратурных каналов:

$$O_3 = \text{MAX}\{|x|, |y|\} \geq L_3(F). \quad (4)$$

Если эффективность оптимального алгоритма (1) хорошо известна, то упрощённые алгоритмы (2) – (4) требуют дополнительного исследования. Оценку эффективности рассматриваемых алгоритмов целесообразно производить по характеристикам обнару-

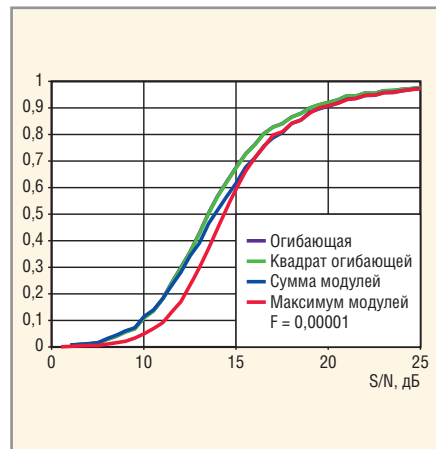


Рис. 2. Результаты расчётов характеристики обнаружения для вероятности ложной тревоги $F = 0,00001$

жения. Для этого предварительно требуется получить зависимость порога обнаружения от вероятности ложной тревоги.

Для оптимальной схемы эта зависимость выражается следующим образом [2]:

$$L(F) = \sqrt{-2 \ln(F)}. \quad (5)$$

Аналогичные выражения для алгоритмов (2) – (4) получаются после соответствующих нелинейных функциональных преобразований:

$$L_1(F) = -2 \ln(F), \quad (6)$$

$$L_2(F) = 2 \operatorname{erf} \operatorname{inv} \sqrt{1-F}, \quad (7)$$

$$L_3(F) = \sqrt{2} \operatorname{erf} \operatorname{inv} \sqrt{1-F}. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) $\operatorname{erf} \operatorname{inv}(\cdot)$ представляет собой инверсную функцию ошибок.

Выражения для вероятности правильного обнаружения для указанных алгоритмов достаточно сложны, поэтому расчёт характеристик обнаружения алгоритмов (1) – (4) был произведён методом статистического моделирования с использованием программы MATLAB.

Результаты расчётов характеристик обнаружения приведены в виде графиков на рисунках 1 и 2 соответственно для вероятностей ложной тревоги $F = 0,001$ и $F = 0,00001$; по оси X отложено отношение сигнал/шум, дБ.

Упрощённые схемы объединения сигналов квадратур могут быть распространены и на многоканальные обнаружители, главное отличие которых состоит в том, что во всех алгоритмах на выходе до порогового устройства присутствует максимальный отбор. При этом оптимальный алгоритм с огибающей имеет вид:

$$O_{\max} = \text{MAX} \left\{ \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \dots, \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \dots, \sqrt{x_N^2 + y_N^2} \right\} \geq L(F), \quad (9)$$

где x_i, y_i – квадратурные составляющие аддитивной смеси сигнала и шума i -го канала, $i = 1, N$.

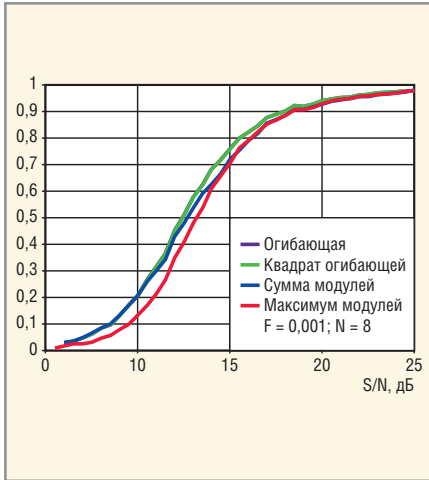


Рис. 3. Результаты расчётов характеристики обнаружения при числе каналов $N = 8$ для вероятности ложной тревоги $F = 0,001$

Так выглядит многоканальный алгоритм с использованием квадратов огибающей:

$$O_{1\max} = \text{MAX} \left\{ x_1^2 + y_1^2, \dots, x_i^2 + y_i^2, \dots, x_N^2 + y_N^2 \right\} \geq L_1(F). \quad (10)$$

А это – многоканальный алгоритм с суммированием модулей:

$$O_{2\max} = \text{MAX} \{ |x_1| + |y_1|, \dots, |x_i| + |y_i|, \dots, |x_N| + |y_N| \} \geq L_2(F). \quad (11)$$

И, наконец, многоканальный алгоритм с отбором максимума модулей сигналов квадратурных каналов:

$$O_{2\max} = \text{MAX} \{ |x_1| + |y_1|, \dots, |x_i| + |y_i|, \dots, |x_N| + |y_N| \} \geq L_3(F). \quad (12)$$

Соответствующие зависимости порогов обнаружения от вероятности ложной тревоги для многоканальных схем обнаружения будут выглядеть следующим образом:

$$L(F) = \sqrt{-2 \ln(1 - (1 - F)^{1/N})}, \quad (13)$$

$$L_1(F) = -2 \ln(1 - (1 - F)^{1/N}), \quad (14)$$

$$L_2(F) = 2 \operatorname{erf} \operatorname{inv} \sqrt{(1 - F)^{1/N}}, \quad (15)$$

$$L_3(F) = \sqrt{2} \operatorname{erf} \operatorname{inv} \sqrt{(1 - F)^{1/2N}}. \quad (16)$$

Расчёт характеристик обнаружения многоканальных алгоритмов (9) – (12) также был произведён методом статистического моделирования с использованием MATLAB. Результаты расчётов характеристик обнаружения приведены в виде графиков для $N = 8$, представленных на рисунках 3 и 4 со-

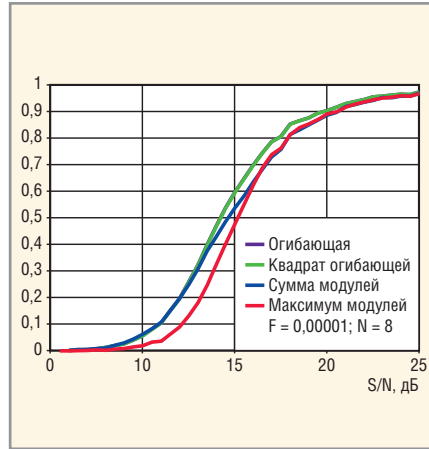


Рис. 4. Результаты расчётов характеристики обнаружения для вероятности ложной тревоги при числе каналов $N = 8$ для вероятности ложной тревоги $F = 0,00001$

ответственно для вероятностей ложной тревоги $F = 0,001$ и $F = 0,00001$; по оси X отложено отношение сигнал/шум, дБ.

Результаты анализа алгоритмов объединения сигналов квадратурных каналов позволяют сделать следующие выводы. Алгоритм с суммированием квадратов квадратурных сигналов ни в чём не уступает оптимальному как при одноканальном, так и при многоканальном обнаружении. Алгоритм с суммированием модулей сигналов квадратурных каналов приводит к несущественным потерям в обнаружении по сравнению с оптимальным алгоритмом.

К несколько большим потерям приводит алгоритм с отбором максимального модуля квадратурных сигналов. Причём эти потери возрастают с уменьшением вероятности ложной тревоги как для одноканальной, так и для многоканальной обработки. При малых вероятностях ложной тревоги эффективность всех алгоритмов практически одинакова. Дополнительные потери, связанные с многоканальной обработкой (для $N = 8$), не превышают 1 дБ. Программа моделирования на языке MATLAB приведена в Приложении к статье, которое размещено на интернет-странице журнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манжос Я.Д., Ширман В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. Радио и связь, 1981.
2. Бартенев В.Г., Медведев В.Н. Цифровые методы обработки радиолокационных сигналов. МРЦ, 1987.

