

УДК: 621.396.96+621.391.821

МЕЖКАНАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛЕЗНЫХ СИГНАЛОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ КАНАЛОВ

В.Г. Бартенов¹, д.т.н., профессор
Г.В. Бартенов²
В.К. Битюков¹, д.т.н., профессор
В.Е. Кутепов²

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

²АО ВНИИРТ, Москва, Россия

Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru

Выполнен сравнительный анализ эффективности различных способов объединения каналов. Показано, что для независимых каналов схема отбора по минимуму уступает по эффективности схеме отбора по максимуму. Учет межканальной корреляции полезных сигналов делает отбор по максимуму и по минимуму близкими по эффективности.

Ключевые слова: многоканальные обнаружители, объединение каналов с максимальным и минимальным отбором, характеристики обнаружения, межканальная корреляция.

THE INFLUENCE OF INTERCHANNEL CORRELATION OF THE DESIRED SIGNALS, BEING COMBINED, ON MULTICHANNEL DETECTORS PERFORMANCE, USING METHODS OF SELECTION BY MAXIMUM AND MINIMUM

V.G. Bartenev¹,
G.V. Bartenev²,
V.K. Bitukov¹,
V.E. Kutepov²

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

²JSC VNIIRT, Moscow, Russia

Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

The comparative efficiency analysis of two ways of multiplexing based on minimum and maximum selection methods has been carried out. It has been shown that minimum selection method is less effective than the maximum one for independent channels. Minimum selection method approaches efficiency of the maximum selection one when considering interchannel desired signal correlation. However this consideration implies the efficiency decrease of maximum selection method, while improving the efficiency of minimum selection one.

Keywords: multichannel detectors, multiplexing based on maximum and minimum selection methods, detection performances, interchannel correlation.

Введение

Во многих радиотехнических системах применяется многоканальная обработка сигналов [1–7]. В частности, при построении обнаружителей движущихся целей для повышения их эффективности используются многоканальные доплеровские фильтры [8], а также многоканальные режекторные фильтры [9]. При этом если в многоканальных доплеровских фильтрах сигнал от цели может появиться в одном из доплеровских каналов, то в многоканальных режекторных фильтрах цель попадает во все каналы, так как зона прозрачности по скорости у них во многом совпадает. Именно для многоканальных режекторных фильтров, наряду со способом объединения по максимуму, в [10] предложено осуществлять объединение каналов с отбором по минимуму. Однако количественного системного анализа до сих пор сделано не было. Представляет практический интерес сравнительный анализ эффективности названных способов объединения каналов применительно к многоканальной обработке сигналов в радиотехнических системах.

Без уменьшения общности подхода к решению задачи сравнения эффективности различных способов объединения каналов, тип и эффективность многоканальных режекторных фильтров в каждом канале в данном исследовании не рассматривали. Их наличие учитывали через влияние межканальной корреляции полезных сигналов при их объединении на характеристики обнаружения.

Кроме того, высказаны предположения, что на входе схем отбора по минимуму или по максимуму в каждом канале действовала аддитивная смесь флуктуирующего сигнала и шума, а детекторы осуществляли выделение квадратов огибающих. При этом в каждой квадратуре на входе квадратичных детекторов действовал гауссов шум с нулевым средним значением и единичной дисперсией; шум в каналах был независимым; полезные сигналы во всех каналах имели одинаковую случайную флуктуирующую амплитуду, были независимы и коррелированы.

Вероятность ложной тревоги для схемы с отбором по максимуму и по минимуму для независимых каналов

Воспользовавшись теоремами сложения и умножения вероятностей применительно к объединению каналов, интегральные законы распределения наибольшей и наименьшей величин при одинаковом распределении N независимых случайных величин можно представить следующими формулами:

$$F_{\max}(x) = \prod_N F(x) \quad (1)$$

и

$$F_{\min}(x) = 1 - \prod_N [1 - F(x)] \quad (2)$$

где $F(x)$ – интегральный закон распределения случайной величины.

Пусть случайные величины в рассматриваемом случае в каждом канале распределены по экспоненциальному закону с единичной дисперсией, тогда интегральный закон имеет вид

$$F(x) = 1 - \exp(-x/2) \quad (3)$$

Подставив (3) в выражения (1) и (2), получают интегральные законы распределения наибольшей и наименьшей величин для N случайных величин:

$$F_{\max}(x) = [1 - \exp(-x/2)]^N \quad (4)$$

и

$$F_{\min}(x) = 1 - [\exp(-x/2)]^N \quad (5)$$

При подстановке вместо переменной x в (4) порог L_{max} , а в (5) порог L_{min} получают вероятности неперевышения этих порогов в схемах с отбором по максимуму и по минимуму, соответственно:

$$F_{max} = [1 - \exp(-L_{max} / 2)]^N, \quad (6)$$

и

$$F_{min} = 1 - [\exp(-L_{min} / 2)]^N, \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) можно получить вероятности превышения порога L_{max} и порога L_{min} , то есть вероятности ложной тревоги:

$$FLT_{max} = 1 - (1 - e^{-L_{max} / 2})^N, \quad (8)$$

$$FLT_{min} = e^{-L_{min} N / 2}. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные пороги L_{max} и L_{min} для вероятностей ложных тревог 10^{-1} и 10^{-5} в случае двухканальной ($N = 2$) и восьмиканальной ($N = 8$) схем.

Таблица 1. Результаты расчета вероятности ложной тревоги

FLT / N	N = 2 L_{max} / L_{min}	N = 8 L_{max} / L_{min}
10^{-1}	5.93 / 2.30	8.67 / 0.57
10^{-5}	24.41 / 11.51	27.18 / 2.87

Вероятность правильного обнаружения флуктуирующего сигнала для схемы с отбором по максимуму и по минимуму

При наличии в аддитивной смеси не только шума, но и флуктуирующего сигнала с отношением сигнал/шум, равным q , интегральный закон распределения в отличие от (3) будет иметь вид

$$F(x) = 1 - \exp(-x / 2(1 + q^2)). \quad (10)$$

Выполнив преобразования аналогичные тем, что были использованы для получения вероятностей ложной тревоги, получают вероятности правильного обнаружения полезного сигнала

$$D_{max} = 1 - (1 - e^{-L_{max} / 2(1 + q^2)})^N, \quad (11)$$

и

$$D_{min} = e^{-(L_{min} / 2(1 + q^2)) N}, \quad (12)$$

Для верификации полученных формул (11) и (12) проведено моделирование двух- и восьмиканальных систем с отбором по максимуму и минимуму для вероятности ложной тревоги 10^{-1} и 10^{-5} . Результаты моделирования и аналитических расчетов представлены в виде характеристик обнаружения на рис. 1 и рис. 3 ($F=10^{-1}$ $N=2$ и 8) и на рис. 2 и рис. 4 ($F=10^{-5}$ $N=2$ и 8).

Основной вывод из представленной на рис. 1–4 информации состоит в том, что для независимых каналов большей эффективностью обладает схема объединения каналов с отбором по максимуму, причем эта эффективность возрастает и с ростом числа каналов, и с уменьшением вероятности ложной тревоги.

Важно также подчеркнуть отличное совпадение результатов аналитических расчетов с результатами моделирования обеих схем объединения каналов, что подтверждает достоверность полученных данных.

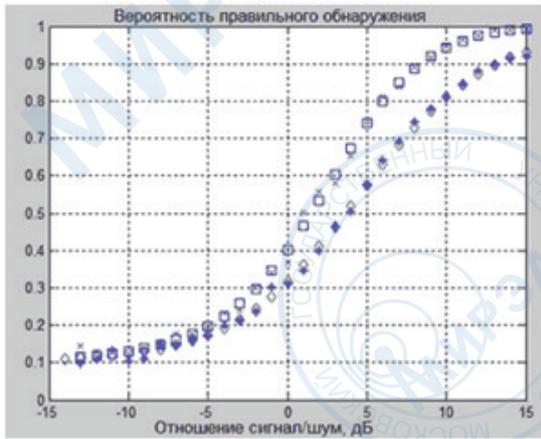


Рис. 1. Характеристики обнаружения двухканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-1}$

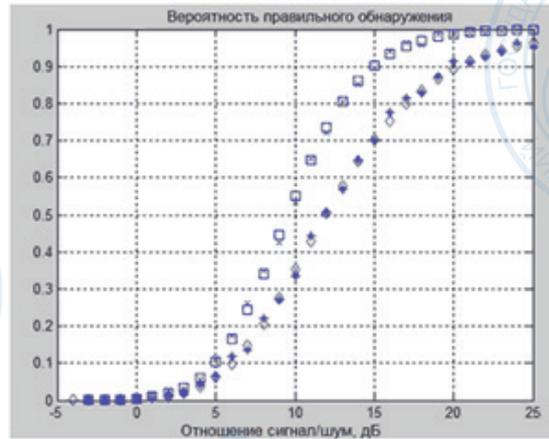


Рис. 2. Характеристики обнаружения двухканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-5}$

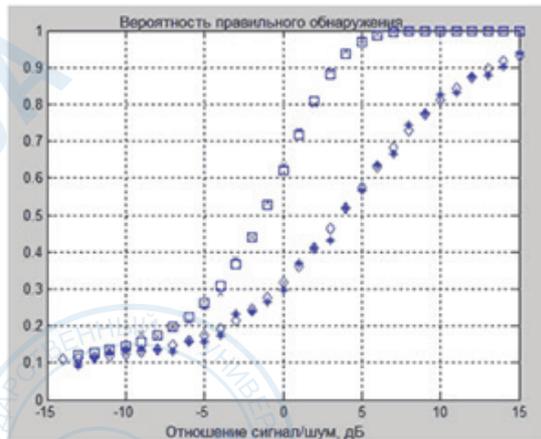


Рис. 3. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-1}$

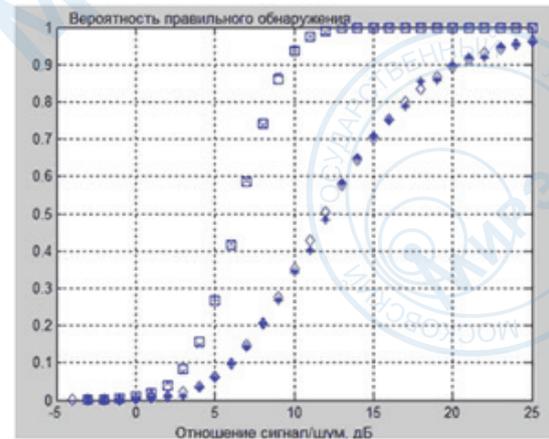


Рис. 4. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-5}$

Влияние межканальной корреляции сигналов до их объединения по максимуму и по минимуму

Теперь целесообразно усложнить рассматриваемую задачу, добавив учет межканальной корреляции полезных сигналов, чтобы приблизить исследование к учету реальной картины, наблюдаемой при построении многоканальных режекторных фильтров, у которых совпадают зоны прозрачности. В этом случае на выходе N канальной схемы с отбором по максимуму и по минимуму вероятности ложной тревоги могут быть представлены, как и раньше, формулами (8) и (9), соответственно. Отметим, что при аналитическом определении вероятностей правильного обнаружения возникают непреодолимые трудности, поэтому вероятности правильного обнаружения рассчитывали только методом статистического моделирования, результаты которого представлены на рис. 5–8.

Из информации, представленной на рис. 5–8, следует, что межканальная корреляция полезных сигналов в меньшей мере влияет на преимущества схемы с отбором по максимуму по сравнению со схемой с отбором по минимуму в отличие от ситуации, когда полезные сигналы

не коррелированы. Более того, при малых вероятностях ложной тревоги схема отбора по минимуму может дать небольшой выигрыш в эффективности.

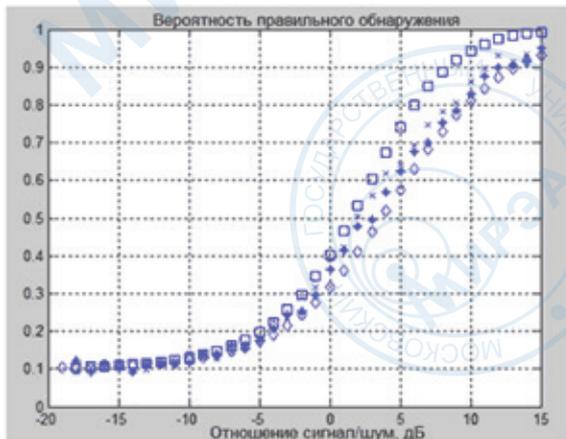


Рис. 5. Характеристики обнаружения двухканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R=0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F=10^{-1}$

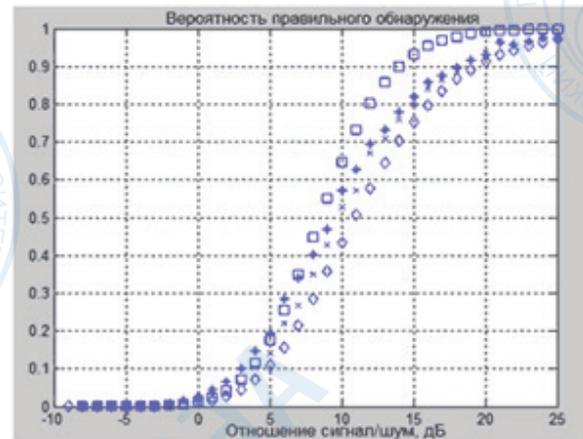


Рис. 6. Характеристики обнаружения двухканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R=0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F=10^{-5}$

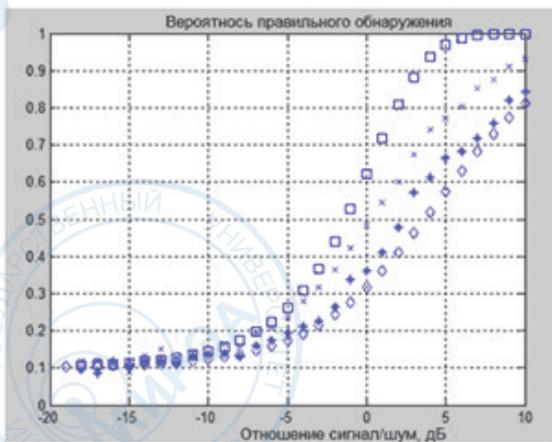


Рис. 7. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R = 0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F = 10^{-1}$

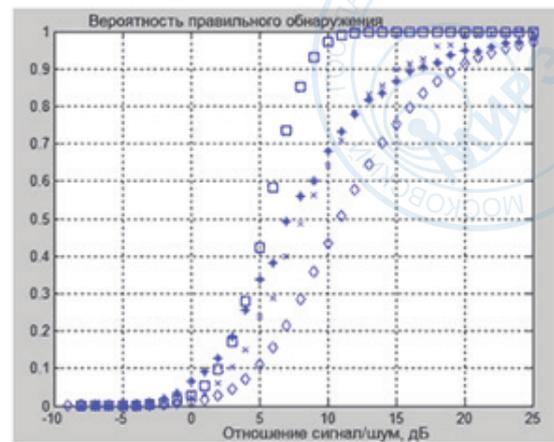


Рис. 8. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R = 0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F = 10^{-5}$

Заключение

Анализ эффективности двух схем объединения каналов по максимуму и по минимуму по характеристикам обнаружения показал, что при любом числе независимых каналов предпочтение следует отдавать схеме с отбором по максимуму. При этом потери в пороговом сигнале для этих сравниваемых схем возрастают с увеличением числа объединяемых каналов. В частности, для 8 независимых каналов и вероятности ложной тревоги 10^{-5} потери в пороговом сигнале для вероятности правильного обнаружения 0.9 составляют 12 дБ. Анализ влияния межканальной корреляции для схем объединения каналов делает отбор по максимуму и по минимуму близкими по эффективности, с одной стороны, ухудшая эффективность для схемы

с отбором по максимуму, с другой – повышая эффективность схемы с отбором по минимуму. При этом для малых вероятностей ложной тревоги и сильной межканальной корреляции схема отбора по минимуму может дать незначительный выигрыш в эффективности.

Литература:

1. Бартенева В.Г. Эффективность объединения квадратурных каналов // Современная электроника. 2010. Вып. 2. С. 78–80.
2. Корляков В.В., Бартенева В.Г., Битюков В.К., Григорьев Л.Н. Всероссийский НИИ радиотехники – 90 лет лидерства // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2011. № 2(6). С. 110–121.
3. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Способ адаптивной фильтрации дискретных коррелированных помех // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2012. № 2(8). С. 48–51.
4. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Способ подавления дискретных коррелированных помех на основе нахождения координат центра окружности вектора полезного сигнала // Научные технологии. 2013. Т. 14. № 10. С. 4–10.
5. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Селектор движущихся целей на фоне дискретных движущихся пассивных помех: пат. 133327 Рос. Федерация. № 2012143984/07; заявл. 16.10.2012; опубл. 10.10.2013.
6. Бартенева В.Г., Бартенева М.В., Битюков В.К. Коэффициент улучшения адаптивных систем селекции движущихся целей авторегрессионного типа // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 3(15). С. 88–92.
7. Бартенева В.Г., Битюков В.К., Конев А.А. Анализ эффективности адаптивной системы СДЦ разностно-фазового типа // Сб. докл. 17-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» DSPA-2015. Москва, 2015. Т. 1. С. 307–311.
8. Бартенева В.Г. Квазиоптимальные адаптивные алгоритмы обнаружения сигналов // Современная электроника. 2011. Вып. 2. С. 70–73.
9. Бартенева В.Г., Битюков В.К., Конев А.А. Анализ эффективности адаптивной разностно-фазовой системы СДЦ авторегрессионного типа // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1(6). С. 82–95.
10. Рындык А.Г., Рябков А.П., Ястребов В.Д. Многоканальный режекторный фильтр с отбором по минимуму // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 4. С. 81–85.