

УДК 621.396.62

Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов¹

Фридман Л. Б., Сеницын Е. А., Ершов Г. А.

*Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиоаппаратуры»
пр. Обуховской обороны, 120, Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

Аннотация: *Проведен анализ эффективности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов. При этом рассмотрен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области, отличающийся тем, что позволяет компенсировать активные помехи (в частности, сигналы цифрового телевидения и сотовой связи) при их многопутевом распространении, вызванном наличием переотражений от местных предметов и подстилающей поверхности. Сформулированы особенности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов. Выполнена оценка влияния формата излучаемых сигналов (скважности зондирующих импульсов) на эффективность метода адаптивной компенсации. Выполнена сравнительная оценка эффективности компенсации активных помех в приемных трактах средств первичной и вторичной радиолокации. Проведен анализ влияния компенсации активных помех на характеристики эффективности обработки сложных радиолокационных сигналов, в частности, на уровень боковых лепестков на выходе фильтра сжатия.*

Ключевые слова: *первичный радиолокатор, активные помехи, адаптивная компенсация, скважность импульсных сигналов, уровень боковых лепестков.*

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Фридман Л. Б., Синицын Е. А., Ершов Г. А. Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 165—173.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Фридман, Л. Б. Эффективность компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов при использовании сложных радиолокационных сигналов / Л. Б. Фридман, Е. А. Синицын, Г. А. Ершов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 165—173.

Effectiveness of compensation of active interference in the receiving paths of primary radars at usage of wideband radar signals

L. B. Fridman, E. A. Sinitsin, and G. A. Ershov

*Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”
120, Pr. Obukhovskoi Oborony, S-Petersburg, 192012, Russian Federation
lenya2002@bk.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

Abstract: *The effectiveness analysis of the adaptive method for active interference compensation in the receiving paths of primary radars is carried out. At that the method of adaptive compensation in the spectral domain is considered. The adaptive method allows to compensate active interference (particularly, digital television and cellular telecommunication) in its multipath propagation (caused by ground clutter). The features of using the adaptive method in the receiving paths of primary radars are formulated. The influence of the format of the transmitted signals (duty cycle of the transmitted signals) on the effectiveness of the adaptive compensation is estimated. A comparative evaluation of the effectiveness of active interference compensation in the receiving paths of primary and secondary radars is performed. The influence of active interference compensation on the effectiveness characteristics of wideband signals processing (in particular, on the sidelobe level at the compression filter output) is estimated.*

Keywords: *primary radars, phase-shift keyed signals, active interference, adaptive compensation, compression filter.*

For citation (IEEE): L. B. Fridman et al. "Effectiveness of compensation of active interference in the receiving paths of primary radars at usage of wideband radar signals," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 165–173, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.10

1. Введение

Широкое распространение новых радиоэлектронных средств (РЭС), работающих в частотном диапазоне первичных радиолокаторов, может уменьшить эффективность функционирования последних. В РФ и зарубежных странах частотный спектр 2500-2690 МГц занят широкополосной системой беспроводной связи LTE. В связи с этим система LTE влияет на работу обзорных радиолокаторов S-диапазона, подверженных влиянию активных помех в полосе частот 2500-2690 МГц [1]. Кроме того, дальнейшее интенсивное развитие новых РЭС приведет к необходимости решения новых проблем, связанных с обеспечением возможности их одновременного функционирования с первичными радиолокаторами.

В [2] был предложен метод адаптивной компенсации активных помех в спектральной области. При этом в [2] рассматривалось использование указанного метода для компенсации помех во вторичных радиолокаторах (ВРЛ) управления воздушным движением. Первичные радиолокаторы отличаются от ВРЛ использованием длинных (до нескольких десятков микросекунд) зондирующих импульсов с внутриимпульсной модуляцией и последующей согласованной [3] или подоптимальной [4, 5] обработкой отраженных сигналов. С учетом указанных факторов, требуется выполнить анализ эффективности метода адаптивной компенсации активных помех при его использовании в приемном тракте первичных радиолокаторов.

2. Особенности использования метода адаптивной компенсации активных помех в приемных трактах первичных радиолокаторов

В [2] влиянием полезного сигнала на процесс компенсации непрерывной помехи пренебрегали ввиду малой длительности (и, как следствие, относительно малой средней мощности) полезного сигнала. В то же время, при компенсации помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность адаптивного метода по следующим причинам:

— первичные радиолокаторы отличаются тем, что в них используются длинные сложные сигналы с внутриимпульсной модуляцией [3] (фазоманипулированные сигналы и сигналы с частотной модуляцией). Поэтому длительность их импульсов может больше, чем у ВРЛ в несколько десятков раз;

— период повторения импульсов у первичных радиолокаторов может быть в несколько раз меньше, чем у ВРЛ в случае использования в первичных радиолокаторах формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [6, 7].

Кроме того, процесс компенсации активной помехи оказывает влияние также и на полезный сигнал. В связи с этим необходимо оценить степень влияния метода адаптивной компенсации на характеристики эффективности обработки сложных радиолокационных сигналов (в частности, на уровень боковых лепестков на выходе согласованного или подоптимального фильтра сжатия).

3. Влияние скважности полезного сигнала на эффективность метода адаптивной компенсации активных помех

Анализ эффективности адаптивной компенсации был проведен с помощью математического моделирования в программной среде “Matlab”. Активная помеха рассматривалась как стационарный шумоподобный комплексный гауссовский случайный процесс. В качестве критерия эффективности использован коэффициент улучшения отношения выходного B_U и входного B_S отношений сигнал/помеха

$$K_Y = B_U - B_S.$$

На рис. 1 показаны результаты выполненного анализа эффективности метода адаптивной компенсации при различных значениях скважности полезного сигнала и B_S . Как следует из рис. 1, при снижении скважности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается. В частности, при снижении скважности с 500 до 5 величина K_Y уменьшилась более чем на 20 дБ. Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи ($B_S = 0$) и малой скважности полезного сигнала (≥ 5) величина K_Y составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

Следует отметить, что малые значения скважности (≤ 20) соответствуют случаю использования в первичном радиолокаторе формата сигналов с повышенной частотой повторения зондирующих импульсов и неоднозначностью по дальности [7, 8].

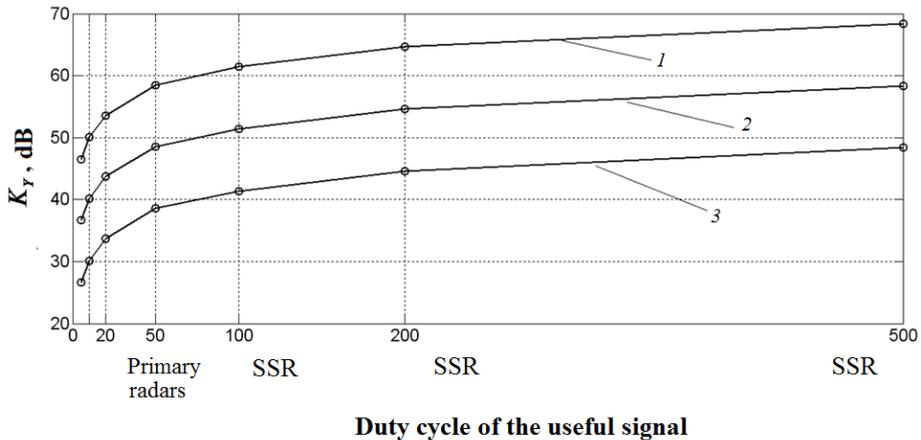


Рис. 1. Зависимость эффективности компенсации активной помехи от скважности полезного сигнала

1: $B_S = -20$ dB; 2: $B_S = -10$ dB; 3: $B_S = 0$ dB.

Fig. 1. Dependence of effectiveness of the active interference compensation on the useful signal duty cycle (SSR – secondary surveillance radars)

1: $B_S = -20$ dB; 2: $B_S = -10$ dB; 3: $B_S = 0$ dB

4. Влияние компенсации активных помех на эффективность обработки сложных радиолокационных сигналов

Процесс компенсации активной помехи оказывает влияние на полезный сигнал [2]. В связи с этим была проведена оценка степени влияния метода адаптивной компенсации на эффективность обработки сложных радиолокационных сигналов. В качестве полезного сигнала рассматривался сигнал с фазовой манипуляцией (ФМ сигнал), выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера [9]. Скважность ФМ сигнала составляла 15. В качестве фильтров сжатия рассматривались согласованный фильтр, а также подоптимальный фильтр, отличающийся тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки (с точностью до величины вычислительной погрешности) [4, 10]. Отношение сигнал/помеха на входе адаптивного компенсатора составляло минус 10 дБ (т. е. полезный сигнал был под шумами).

На рис. 2 показан выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации. Как следует из рис. 2, нескомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенсации). Следовательно, нескомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

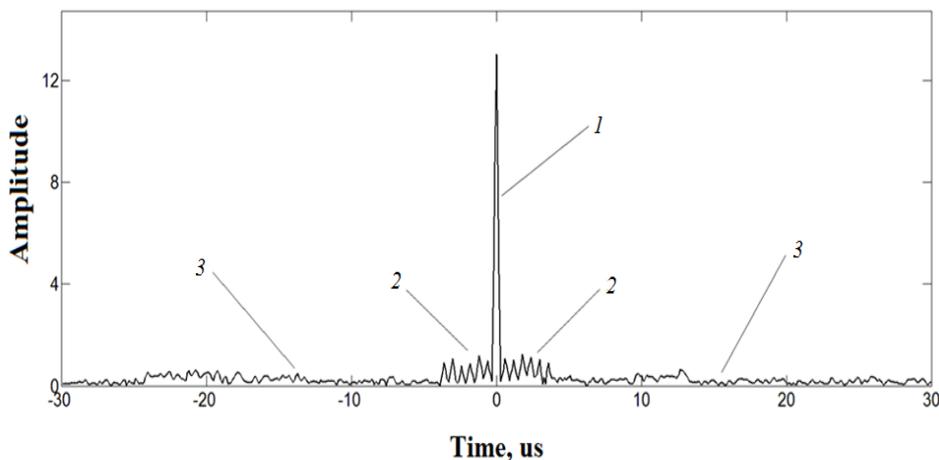


Рис. 2. Выходной сигнал согласованного фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации[^]

- 1* — основной пик сжатого ФМ сигнала;
- 2* — боковые лепестки ФМ сигнала;
- 3* — нескомпенсированные остатки активной помехи.

Fig. 2. The matched compression filter output when exposed to active interference and performing its compensation:

- 1* – main peak of the compressed phase-shift keyed signal;
- 2* – sidelobes of the compressed phase-shift keyed signal;
- 3* - uncompensated residues of active interference

На рис. 3 показан выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала [4]. Указанный фильтр отличается тем, что на его выходе отсутствуют боковые лепестки. Из рис. 3 следует, что после выполнения компенсации на выходе подоптимального фильтра остались только основной пик полезного сигнала и нескомпенсированные остатки активной помехи. Таким образом, уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра определяется только уровнем компенсации активной помехи.

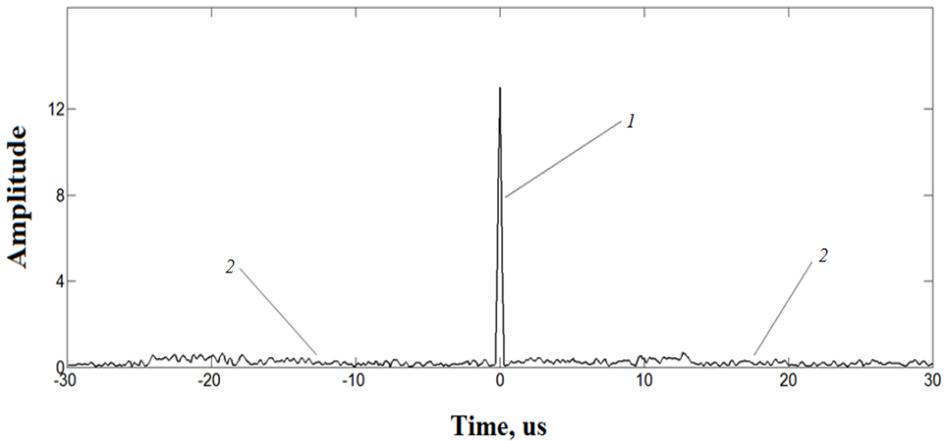


Рис. 3. Выходной сигнал подоптимального фильтра сжатия ФМ сигнала при воздействии активной помехи и выполнении ее компенсации:
1 — основной пик сжатого ФМ сигнала;
2 — некомпенсированные остатки активной помехи.

Fig. 3. The mismatched compression filter output when exposed to active interference and performing its compensation:
1 – main peak of the compressed phase-shift keyed signal;
2 - uncompensated residues of active interference

5. Заключение

При использовании метода адаптивной компенсации активных помех в первичных радиолокаторах полезный сигнал может оказать значительное влияние на эффективность метода.

При снижении скважности полезного сигнала эффективность метода адаптивной компенсации значительно ухудшается (при снижении скважности с 500 до 5 отношение сигнал/помеха уменьшилось более чем на 20 дБ). Тем не менее, даже при низком уровне активной помехи (на уровне амплитуды полезного сигнала) и малой скважности полезного сигнала (≥ 5) улучшение отношения сигнал/помеха составляет не менее 26 дБ, что свидетельствует о достаточно высокой потенциальной эффективности использования метода адаптивной компенсации в приемных трактах первичных радиолокаторов.

При согласованном сжатии сигнала с фазовой манипуляцией, выполненной в соответствии с 13-элементным кодом Баркера, некомпенсированные остатки активной помехи по уровню оказались значительно меньше, чем боковые лепестки полезного сигнала (благодаря компенса-

ции). Следовательно, нескомпенсированные остатки активной помехи практически не повлияли на разрешающую способность по дальности.

Уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра [4] определяется только уровнем компенсации активной помехи.

Список литературы

- 1 Versmissen H. Study of the performance degradation of the Belgian S-band air surveillance radars due to the interference of upcoming 4G technologies. Test Report, 2011. 55 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bipt.be/en/425/ShowDoc/3527/Communications/Study_of_the_Performance_Degradation_of_the_Belgia.aspx (дата обращения: 16.03.2019).
- 2 Фридман Л. Б., Зубков В. А., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б. Пат. 103008 (РФ). Устройство адаптивной компенсации телевизионных помех. Оpubл. в Б. И., 2011. № 8.
- 3 Levanon N., Mozeson E. Radar signals. John Wiley & Sons, Inc., 2004. 411 с.
- 4 Lehtinen M., Dantie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // *Annales Geophysicae*. 2004. T. 22. С. 1623—1632.
- 5 Korshunov A. Yu., Mazayan N. R., Nikolaev S. P., Sinitin E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B. Phase-shift keyed signal compression using a mismatched sidelobe-free filter in the presence of Doppler frequency shift // *Proc. of CriMiCo'2012 — 2012 22nd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 2—8, 2012)* — С. 1084—1085.
- 6 Cho J. Y. N. Multi-PRI signal processing for the terminal Doppler weather radar. Part II: Range-velocity ambiguity mitigation // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 22. 2005. С. 1507—1519.
- 7 Фридман Л. Б., Коршунов А. Ю., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Шильдкрет А. Б. Эффективность метода раскрытия неоднозначности измерения дальности для первичных радиолокационных станций // *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2013. № 1 (9). С. 54—58.
- 8 Korshunov A. Yu., Fridman L. B., Sinitin E. A. Effectiveness of range ambiguity mitigation in primary radars when using signals with high pulse-repetition frequency // *Proc. of CriMiCo 2013 — 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings (Sevastopol, Sept. 8—14, 2013)*. — С. 1154—1155.
- 9 Barker R. Group Synchronizing of Binary Digital Systems, in: *Communications Theory*, edited by W. Jackson. Academic Press, 1953. С. 273—287.
- 10 Fridman L. B., Ershov G. A., Myasnikov S. A., Perelomov V. N., Sinitin E. A. Compression of phase-shift keyed signals by means of the mismatched sidelobe-free filter with application to coherent pulse radar // *Proc. of European Microwave Week 2017 : “A Prime Year for a Prime Event,” EuMW 2017 — Conference Proceedings; 14th European Microwave Conference, EURAD 2017 (Nuremberg, Germany, Oct. 12—14, 2017)*. — С. 235—238.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, Главный конструктор по системам радиолокации Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ершов Герман Анатольевич, Заместитель генерального конструктора — начальник управления проектами Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, senior scientific researcher of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.

Eugeny A. Sinitsin, chief designer of radar systems of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.

German A. Ershov, deputy general designer – head of project management of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St.-Petersburg, Russian Federation.