

Для цитирования: Сеницын В. А., Сеницын Е. А., Страхов С. Ю. Компенсация мешающих сигналов телевизионного вещания в приемном тракте вторичного радиолокатора // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 25–29. УДК.621.396

В. А. Сеницын¹, Е. А. Сеницын¹, С. Ю. Страхов¹

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова

КОМПЕНСАЦИЯ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ ВТОРИЧНОГО РАДИОЛОКАТОРА

Предложен способ адаптивной компенсации телевизионных помех, позволяющий решить задачу радиолокационного наблюдения воздушного пространства методами вторичной радиолокации на частоте 740 МГц в условиях воздействия телевизионных помех, значительно превышающих мощность полезного сигнала в раскрытые антенны вторичных радиолокаторов. Рассмотрены особенности схемно-технической реализации и показатели эффективности предложенного способа. Приведены результаты анализа влияния различных факторов на качество компенсации телевизионных помех. Показано, что высокий уровень компенсации сохраняется даже для наиболее сложного случая при азимутальном расположении источника телевизионной помехи и летательного аппарата в пределах диаграммы направленности антенны. Предлагаемый способ может быть применен в действующих вторичных радиолокаторах, вторичных каналах радиолокационных комплексов и радиолокационных системах посадки, содержащих вторичные радиолокационные каналы, с целью повышения помехозащищенности радиоэлектронных средств управления воздушным движением в условиях действия активных телевизионных помех.

Ключевые слова: вторичная радиолокация, телевизионные помехи, управление воздушным движением.

Ввиду расширения количества каналов цифрового телевизионного вещания в дециметровом диапазоне длин волн (700–900 МГц) возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости наземных и бортовых радиоэлектронных средств управления воздушным движением летательных аппаратов гражданской и государственной авиации со средствами современного телевидения.

В системах вторичной радиолокации, работающих в режиме управления воздушным движением (УВД), в ответ на запрос наземных вторичных радиолокаторов (ВРЛ) бортовые ответчики летательных аппаратов (ЛА) излучают ответные сигналы на частоте 740 МГц.

Пакеты ответных импульсных сигналов ЛА принимаются на земле радиоприемным трактом, а затем обрабатываются и декодируются в аппаратуре первичной обработки информации (АПОИ) ВРЛ с целью выделения полетной информации о ЛА (бортовой номер, высота полета, запас топлива, параметры состояния бортового оборудования).

С выхода ВРЛ полученная полетная информация о ЛА передается в систему управления воздушным движением на диспетчерские пункты УВД.

Телевещание на несущих частотах, близких к 740 МГц (51–57-е телевизионные каналы), в районе аэродромов, на которых установлены ВРЛ, нарушает работу радиоприемного тракта и АПОИ ВРЛ.

Поэтому необходимо принять технические меры по повышению помехозащищенности радиоприемных трактов ВРЛ в условиях действия непреднамеренных активных телевизионных помех.

В работе рассмотрены предложения по обеспечению условий совместного использования дециметрового диапазона длин волн средствами телевидения и средствами ВРЛ УВД.

Для решения задачи выделения полезного сигнала (ответного сигнала бортового ответчика) из смеси с телевизионной (ТВ) помехой, имеющей общие спектральные составляющие с полезным сигналом, предлагается использовать метод адаптивной компенсации активных помех [1, 2].

В основе реализации способа адаптивной компенсации активной телевизионной помехи может быть положена процедура вычитания составляющих ТВ-помехи из наблюдаемой ее смеси с полезным сигналом путем использования взвешенного эталона ТВ-помехи, полученного по дополнительному (компенсационному) приемному каналу, антенна которого постоянно направлена на источник ТВ-помехи [3].

Процесс адаптации при этом состоит в подстройке весового коэффициента $K(\varphi)$ для каждого азимутального направления φ оси диаграммы направленности антенны (ДНА) ВРЛ, который определяется каналами распространения ТВ-помехи

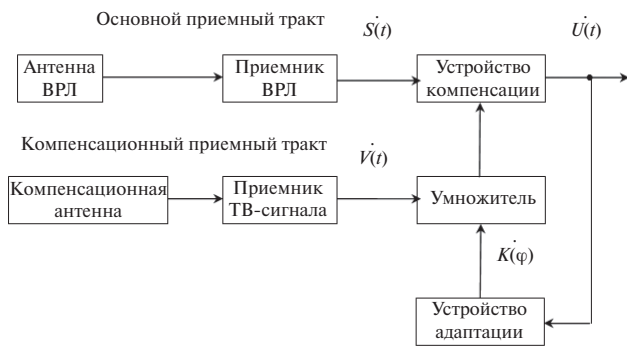


Рисунок 1. Схема приемного тракта ВРЛ с использованием метода адаптивной компенсации ТВ-помехи

в приемном тракте ВРЛ и в компенсационном тракте (рис. 1).

Антенна ВРЛ непрерывно вращается в азимутальной плоскости и в процессе обзора воздушного пространства излучает запросные импульсы и принимает на частоте $740 \pm 1,8$ МГц ответные сигналы от бортовых ответчиков ЛА, работающих в режиме УВД.

Комплексная огибающая смеси полезного сигнала $\dot{S}_C(t)$ и ТВ-помехи на выходе приемника ВРЛ представляет собой сумму комплексных огибающих полезного сигнала и телевизионной помехи $\dot{S}_{TV}(t)$:

$$\dot{S}(t) = \dot{S}_C(t) + \dot{S}_{TV}(t).$$

Аналогичным образом комплексная огибающая смеси ТВ-помехи и сигнала на выходе приемника компенсационного канала может быть представлена выражением

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_{TV}(t) + \dot{V}_C(t),$$

где $\dot{V}_{TV}(t)$ и $\dot{V}_C(t)$ – соответственно комплексные огибающие ТВ-помехи и сигнала на выходе приемника компенсационного канала.

Процедуру компенсации ТВ-помехи в смеси с полезным сигналом можно определить выражением

$$\dot{U}(t) = \dot{S}(t) - \dot{K}(\varphi)\dot{V}(t) = \dot{U}_C(t) + \dot{U}_{TV}(t),$$

где $\dot{U}_C(t) = \dot{S}_C(t) - \dot{K}(\varphi)\dot{V}_C(t)$ – полезный сигнал после компенсации помехи; $\dot{U}_{TV}(t) = \dot{S}_{TV}(t) - \dot{K}(\varphi)\dot{V}_{TV}(t)$ – остатки мешающего сигнала после компенсации помехи.

Комплексный коэффициент $\dot{K}(\varphi)$ подбирается в устройстве адаптации таким образом, чтобы минимизировать среднее значение мощности помехи на выходе устройства компенсации $(P_{TV})_{\text{вых}}$.

Минимум величины $(P_{TV})_{\text{вых}}$ достигается при условии

$$\overline{\dot{U}_{TV}^2(t)} \rightarrow \min_{\dot{K}(\varphi)} \overline{(\dot{U}_{TV}^2(t))}.$$

Поскольку при любом направлении φ антенны ВРЛ сигнальная составляющая $\dot{U}_C(t)$ сравнительно мала (в силу кратковременности полезного сигнала), она не влияет на результат работы устройства адаптации, что позволяет сформулировать алгоритм выработки весового коэффициента $\dot{K}(\varphi)$ в виде выражения

$$\overline{\dot{U}^2(t)} \rightarrow \min_{\dot{K}(\varphi)} \overline{(\dot{U}^2(t))}.$$

При реализации алгоритма адаптации значения $\dot{K}(\varphi)$ предлагается рассчитывать исходя из условия минимизации смеси сигнала и ТВ-помехи на выходе устройства компенсации.

Приемный тракт ВРЛ, как правило, содержит два канала: основной канал и канал подавления ответных сигналов, принятых по боковым лепесткам ДНА ВРЛ.

На рис. 2 приведена схема приемного тракта ВРЛ со встроенным адаптивным компенсатором телевизионной помехи (АКТП).

Компенсационный канал, включающий компенсационную антенну и приемник ТВ-сигнала, подключен одновременно к основному каналу и каналу подавления боковых лепестков.

В работе рассматривается предложенный способ адаптивной компенсации применительно к основному приемному каналу ВРЛ и к схеме на рис. 1. Полученные результаты анализа могут быть применены и для канала подавления.

Проверка работоспособности адаптивного компенсационного метода подавления ТВ-помехи в основном приемном тракте ВРЛ проведена методом математического моделирования в идеализированных условиях [4], которые характеризуются:

- отсутствием шумов наблюдения, приведенных ко входу антенны ВРЛ;
- неограниченно большим линейным динамическим диапазоном приемного тракта ВРЛ;
- отсутствием задержек в основном и компенсационном трактах.

В качестве модели антенной системы ВРЛ использована антенная решетка реально существующего ВРЛ «Радуга» [4], одна из рабочих частот которой равна 740 МГц.

Для модели антенны компенсационного канала принята также антенная система ВРЛ «Радуга», ось диаграммы направленности (ДН) которой направлена на источник ТВ-помехи. Модули диаграмм направленности антенной системы «Радуга» приведены на рис. 3.

При моделировании работы АКТП адаптация производилась по наблюдаемому сигналу $\dot{U}(t)$. ТВ-помеха рассматривалась как стационарный

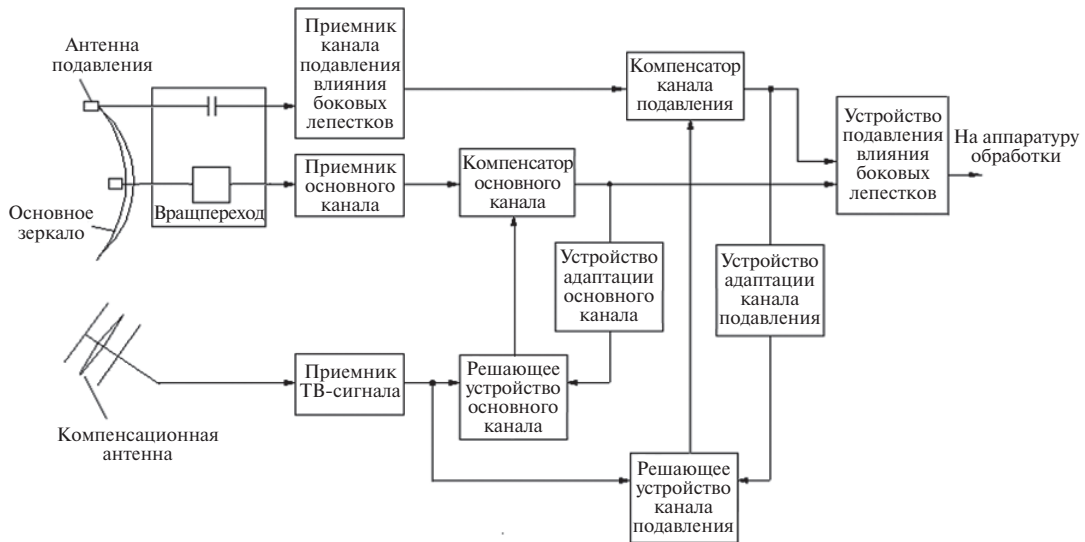


Рисунок 2. Схема приемного тракта ВРЛ со встроенным АКТП

шумоподобный комплексный гауссовый случайный процесс [5, 6].

Отношение сигнал/помеха в точке приема радиоволны принималось постоянным и равным -30 дБ. Ось ДН компенсационной антенны направлена на источник ТВ-помехи.

Выходной сигнал АКТП при азимутальном разнесе источника ТВ-помехи и летательного аппарата (ЛА) $\Delta\varphi$, равном 43° , показан на рис. 4. Отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе адаптивного компенсатора составило ~ 60 дБ.

На рис. 5 показан выходной сигнал АКТП при $\Delta\varphi$, равном 1° . ОСП на выходе АКТП в данном случае составило также ~ 60 дБ. Заметим, что второй случай соответствует нахождению источника ТВ-помехи и ЛА в пределах ДН антенн (в одном створе), так как ширина основного лепестка диаграммы направленности основной и компенсационной антенн составляет $\sim 4^\circ$.

Моделирование работы АКТП в условиях полного азимутального совпадения источника ТВ помехи и ЛА (вырожденное решение, поскольку в этом случае ДН основной и компенсационной антенн строго совпадают), как и следовало ожидать, абсолютно не дало выигрыша (рис. 6), так как сигнал и помеха в этом случае по азимуту неразделимы.

Из сопоставления данных рис. 4 и 5 следует, что при рассматриваемых идеализированных условиях выходное ОСП остается практически неизменным даже при азимутальном разнесе источника ТВ-помехи и ЛА, составляющем 1° .

Неограниченно большой линейный динамический диапазон приемного тракта позволяет поддерживать постоянно высокий (порядка 60 дБ) уровень выходного отношения сигнал/помеха при различных взаимных азимутальных положениях источника ТВ-помехи и ЛА.

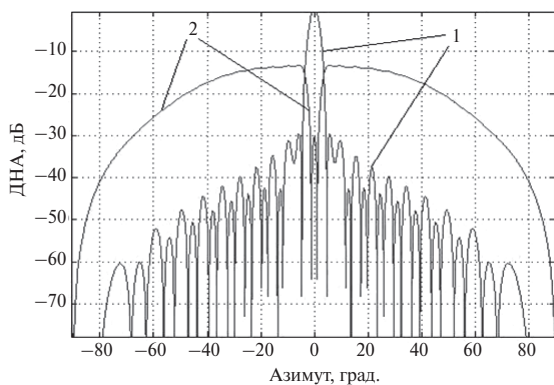


Рисунок 3. Диаграммы направленности антенной ВРЛ «Радуга»: 1 – ДН основной антенны; 2 – ДН антенны подавления

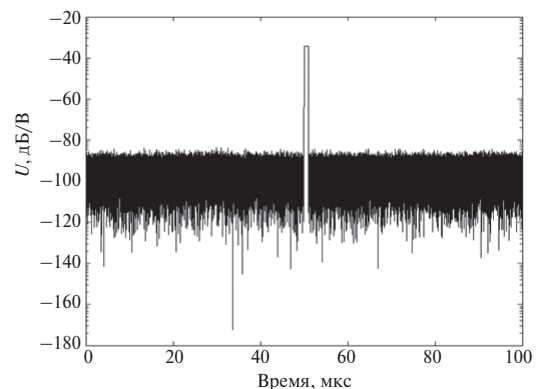


Рисунок 4. Огибающая выходного сигнала устройства компенсации при $\Delta\varphi = 43^\circ$

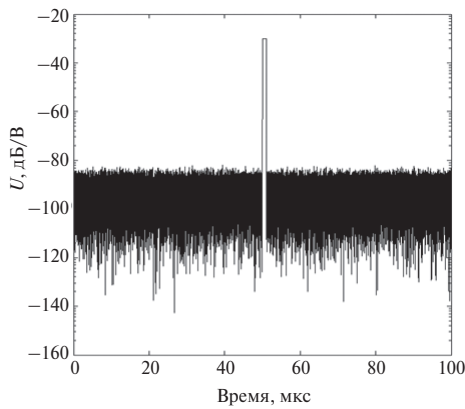


Рисунок 5. Огибающая выходного сигнала устройства компенсации при $\Delta\varphi = 1^\circ$

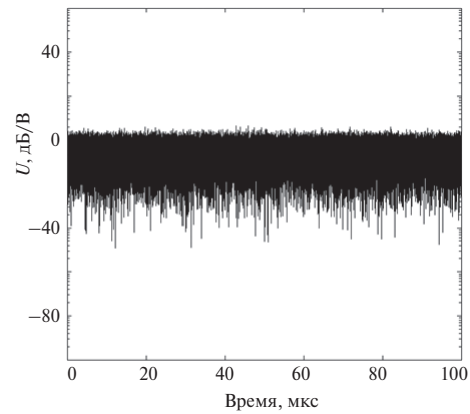


Рисунок 6. Огибающая выходного сигнала устройства компенсации при $\Delta\varphi = 0^\circ$

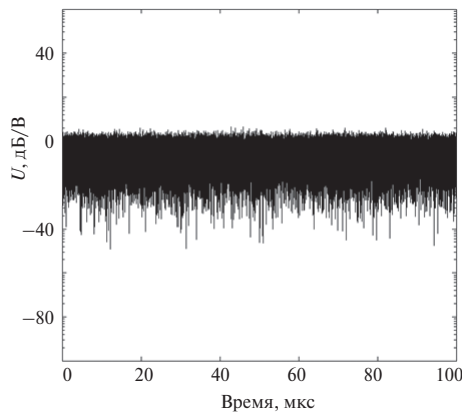


Рисунок 7. Огибающая сигнала $\dot{U}(t)$ при выключенном компенсаторе ($\Delta\varphi = 43^\circ$)

Таким образом, в рассматриваемых идеализированных условиях, с учетом входного ОСП, составляющего -30 дБ, общий выигрыш отношения сигнал/помеха при использовании адаптивного компенсатора составляет постоянную величину $60 - (-30) = 90$ дБ.

Качественная оценка выигрыша, вызванного включением АКТП, может быть получена путем

сравнения рис. 4 и рис. 7, соответствующего варианту отключения компенсатора.

Выводы

1. Предложен способ адаптивной компенсации ТВ-помех, позволяющий решить задачу радиолокационного наблюдения воздушного пространства методами вторичной радиолокации на частоте 740 МГц в условиях воздействия ТВ-помех, значительно превышающих мощность полезного сигнала в раскрыве антенны ВРЛ, например, для рассмотренного идеализированного случая на величину до 90 дБ.

2. Показано, что высокий уровень компенсации сохраняется даже для наиболее сложного случая при азимутальном расположении источника ТВ-помехи и ЛА в пределах диаграммы направленности антенны.

3. Предлагаемый способ может быть применен в действующих вторичных радиолокаторах, вторичных каналах радиолокационных комплексов и радиолокационных системах посадки, содержащих вторичные радиолокационные каналы, с целью повышения помехозащищенности функционирования радиоэлектронных средств УВД в условиях действия активных ТВ-помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / А.П. Лукошкин, С.С. Каринский, А.А. Шаталов и др.; под ред. А.П. Лукошкина. М.: Радио и связь, 1983. 328 с.
2. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
3. Gao H. T., Zheng X., Li J. Adaptive anti-interference technique using subarrays in HF surface wave radar. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2004, no. 151 (2), pp. 100–104.
4. Обеспечение электромагнитной совместимости средств телевидения с наземными и бортовыми радиоэлектронными средствами в целях высвобождения частотного ресурса для развития сетей телевидения // Сборник докладов VIII Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» / С.Ф. Николаев, Е.А. Синицын, Л.Б. Фридман, А.Б. Шильдкрет. Т. 2. С. 706–713.
5. Седякин М.Н. Элементы теории случайных импульсных потоков. М.: Советское радио, 1965. 263 с.
6. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Синицын Владимир Александрович, к.т.н., доцент кафедры, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, e-mail: sinbgtu@yandex.ru.

Синицын Евгений Александрович, д.т.н., профессор кафедры, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, e-mail: esinit@yandex.ru.

Страхов Сергей Юрьевич, д.т.н., профессор, декан факультета, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, e-mail: strakhov_s@mail.ru.

For citation: Sinitsyn V. A., Sinitsyn E. A., Strakhov S. Yu. The compensation of interfering signals of television broadcasting in the receiving channel of the secondary radar. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 1, pp. 25–29.

V. A. Sinitsyn, E. A. Sinitsyn, S. Yu. Strakhov

THE COMPENSATION OF INTERFERING SIGNALS OF TELEVISION BROADCASTING IN THE RECEIVING CHANNEL OF THE SECONDARY RADAR

The method for adaptive compensation of television disturbances is proposed. This method allows to solve the problem of radar surveillance of the air space by the secondary radar at a frequency of 740 MHz in the conditions of influence of television disturbances far exceeding the power of the useful signal in the aperture of the antenna secondary radar. The features of the technical realization and effectiveness of the proposed method are considered. The results of the analysis of the influence of various factors on the quality of compensation television disturbances are presented. It is shown that a high level of compensation is maintained even for the most difficult case when the azimuthal location of the source of television interference and aircraft within the radiation pattern of the antenna takes place. The proposed method can be applied in existing secondary radar, the secondary channels of radar systems and radar landing system containing the secondary radar channels, with the aim of increasing the noise immunity of electronic equipment for air traffic control in the conditions of action of the active television interference.

Keywords: secondary radar, television interference, air traffic control.

REFERENCES

1. Lukoshkin A. P., Karinskiy S. S., Shatalov A. A. et al. *Obrabotka signalov v mnogokanalnyh RLS* [Signal processing in multi-channel radars]. In: A. P. Lukoshkin, ed. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983, 328 p. (In Russian).
2. *Teoreticheskie osnovy radiolokacii* [Theoretical fundamentals of radiolocation]. In: Ya. D. Shirman, ed. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 560 p. (In Russian).
3. Gao H. T., Zheng X., Li J. Adaptive anti-interference technique using subarrays in HF surface wave radar. *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings*, 2004, no. 151 (2), pp. 100–104.
4. Nikolaev S. F., Sinitsyn E. A., Fridman L. B., Shildkret A. B. Maintenance of electromagnetic compatibility of telecasting equipment with on-ground and on-board radio electronic devices for the purpose of releasing band resource for development of telecasting networks. *Sbornik dokladov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka»*. vol. 2, pp. 706–713 (In Russian).
5. Sedyakin M. N. *Jelementy teorii sluchajnyh impulsnyh potokov* [Elements of the theory of random impulse flows]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965, 263 p. (In Russian).
6. Volkov L. N., Nemirovskiy M. S., Shinakov Yu. S. *Sistemy cifrovoj radiosvjazi* [Digital radio communication systems]. Moscow, Eko-Trendz, 2005, 392 p. (In Russian).

AUTHORS

Sinitsyn Vladimir, PhD, associate professor of Department, Baltic State Technical University VOENMEH, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: sinbgtu@yandex.ru.

Sinitsyn Evgeniy, Dr., professor of Department, Baltic State Technical University VOENMEH, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: esin-it@yandex.ru.

Strakhov Sergey, Dr., professor, decan of the faculty, Baltic State Technical University VOENMEH, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: strakhov_s@mail.ru.