

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОМПЕНСАТО- РОВ ПОМЕХ в задачах обеспечения ЭМС радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов

УДК 621.396, DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.58.62

А.Мирошниченко, инженер ГосНИИАС / Mirosh.A.V@yandex.ru,
С.Шаврин, д.т.н., профессор МТУСИ / sss@mtuci.ru

Статья посвящена решению задачи обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) бортового радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов (ЛА). В работе предлагается метод обеспечения электромагнитной совместимости различных радиоэлектронных средств на примере решения задачи ЭМС аналоговых голосовых радиостанций и линии передачи данных режима VDL mode 4.

ВВЕДЕНИЕ

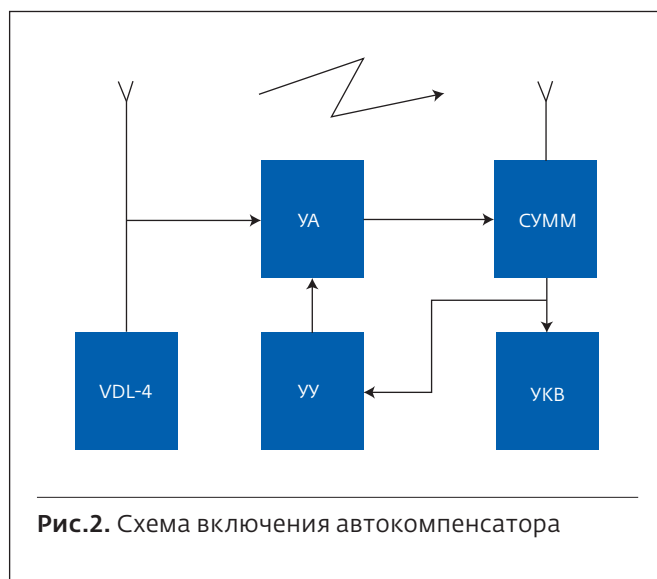
Летательный аппарат является сложной системой, где имеется множество бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), размещаемого в ограниченном объеме. Это влечет за собой требование обеспечения ЭМС всего бортового оборудования, что не всегда удается сделать, как в случае аналоговых голосовых радиостанций и линии передачи данных режима 4.

УКВ-линия передачи данных режима 4, также известная под названием Very High Frequency Data Link mode 4 (VDL mode 4), предназначена для передачи полетной информации, в частности, местоположения ЛА другим самолетам и диспетчеру [1]. Внедрение VDL mode 4 обеспечивает реализацию самоорганизующейся сетевой концепции автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В), которая позволяет значительно повысить

безопасность полетов гражданской, военной и беспилотной авиации.

Тематика VDL mode 4 активно разрабатывается на ряде предприятий Российской Федерации. Среди них можно особо выделить ГосНИИАС, как главного в стране разработчика концепции и параметров VDL mode 4, и ООО "Фирма НИТА", как основного разработчика и поставщика такого оборудования. С начала 2010-х годов оборудование VDL mode 4 начало массово устанавливаться на авиационную технику.

Установка оборудования VDL mode 4 выявила серьезную проблему, связанную с электромагнитной совместимостью. На части ЛА, выпущенных несколько десятилетий назад, например на вертолетах МИ-8 выпуска 1960–80-х годов, смонтировано устаревшее БРЭО, не удовлетворяющее современным требованиям ЭМС. Приемопередатчик VDL mode 4 в процессе своей



работы наводит помеху на приемник аналоговой голосовой радиостанции радиотелефонной связи. Помеха выражается в виде неприятного звука – "щелчков" в наушниках у пилота [2, 3].

Анализ способов обеспечения ЭМС между VDL mode 4 и аналоговой радиостанцией

VDL mode 4 передает сообщения посылками, длина одной посылки составляет 13,33 мс. Передача осуществляется с канальной скоростью 19,2 кбит/с.

VDL mode 4 предназначен для работы в полосе 25 кГц в частотном диапазоне от 116 до 137 МГц. В этом же частотном диапазоне работает множество других систем БРЭО, включая радиотелефонные радиостанции [4]. Радиотелефонная голосовая радиостанция предназначена для радиосвязи между пилотами и между пилотом и диспетчером. Передача осуществляется с помощью амплитудной модуляции с двумя боковыми и несущей. Шаг перестройки и частотный диапазон совпадают с VDL mode 4 и составляют те же 25 кГц и от 116 до 137 МГц соответственно. Кроме выше-названных систем, в этом же частотном диапазоне работает множество систем БРЭО, таких как радиокомпасы, аварийные маяки, системы автоматической посадки и многие другие.

Проблема ЭМС VDL mode 4 и радиотелефонной радиостанции выражается, как отмечалось выше, в акустических "щелчках" в наушниках. На рис.1 приведена осциллограмма сигнала на входе наушников в момент "щелчка".

"Щелчок" вызван проникновением сигнала VDL mode 4 в приемный тракт радиостанции. В данный момент проблема решается частотной отстройкой каналов VDL mode 4 от каналов голосовой

радиосвязи примерно на 2–3 МГц вместо предполагаемых стандартом 25–50 кГц.

Для радикального решения задачи предлагается включение автокомпенсатора согласно схеме, представленной на рис.2.

На этом рисунке приняты следующие обозначения: VDL-4 – приемопередатчик VDL mode 4; YA – устройство адаптации; УУ – устройство управления; СУММ – сумматор; УКВ – УКВ-радиостанция радиотелефонной связи.

Автокомпенсатор состоит из устройства адаптации, устройства управления и сумматора. Один вход автокомпенсатора подключается к выходу передатчика VDL mode 4, вторым концом компенсатор подключается в разрыв между антенной и входом приемника голосовой радиостанции. Сигнал голоса, принятый антенной, попадает на сумматор, где складывается с сигналом компенсатора. Полученный аддитивный сигнал подается на вход приемника радиостанции.

Сигнал, полученный с выхода передатчика VDL mode 4, поступает на устройство адаптации, которое представляет собой адаптивный КИХ-фильтр с перестраиваемыми коэффициентами. Коэффициенты адаптации управляются устройством управления по заданному алгоритму. Устройство управления анализирует сигнал на входе приемника радиотелефонной связи и перестраивает коэффициенты устройства адаптации.

Существует множество критериев настройки коэффициентов устройства адаптации, наиболее популярный из которых – критерий минимума среднеквадратичного отклонения величины остаточного сигнала. Аналитически данный критерий выражается как [5]:

$$W_{\text{опт}} = R_{xx}^{-1} p_{xг}, \quad (1)$$

где $w_{\text{опт}}$ – вектор оптимальных коэффициентов,
 R_{xx} – автокорреляционная матрица опорного сигнала,
 $p_{xг}$ – взаимокорреляционная матрица входного и опорного сигналов.

При расположении автокомпенсатора, согласно рис.2, опорным сигналом (сигналом помехи) является сигнал на входе УА, а входным сигналом (сумма сигнала и помехи) – сигнал на выходе приемной антенны.

В работах [6, 7] приведены различные алгоритмы настройки УА по критерию (1). Рассмотрим два самых распространенных.

Алгоритм настройки УА нормализованным методом наименьших средних квадратов (НМНСК):

$$h(i+1, j) = h(i, j) + \frac{\mu y(i) z(i-j)}{\sum_{k=0}^{K-1} x_{i-k}^2 + \rho},$$

где i – номер отсчета сигнала,
 j – номер отвода УА,
 h – коэффициенты отводов УА,
 x – входной сигнал,
 y – опорный сигнал,
 z – выходной сигнал,
 μ – параметр адаптации,

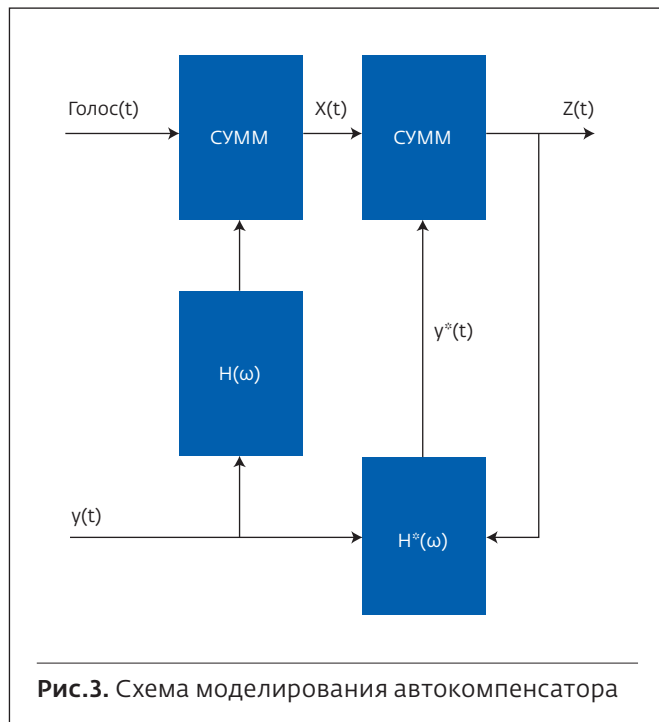


Рис.3. Схема моделирования автокомпенсатора

ρ – малое число для предотвращения деления на ноль.

Алгоритм настройки УА корреляционным методом:

$$h = \frac{y^* z}{\mu D_y + \rho},$$

где h – вектор коэффициентов отводов УА,
 y – вектор опорного сигнала,
 z – вектор выходного сигнала,
 D_y – дисперсия опорного сигнала,
 μ – параметр адаптации,
 ρ – малое число для предотвращения деления на ноль,
 $*$ – символ операции свертки.

Для алгоритмов адаптации добавлено ограничение для улучшения стабильности схождения, которое ограничивает максимальную величину шага адаптации:

$$h(i, j) = \begin{cases} \beta, & \text{если } h(i, j) > \beta \\ h(i, j), & \text{если } -\beta < h(i, j) < \beta \\ -\beta, & \text{если } h(i, j) < -\beta \end{cases}$$

где h – значение приращения к отводу на i -м шаге,
 β – максимальный шаг приращения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОКОМПЕНСАТОРА

На рис.3 приведена схема моделирования автокомпенсатора.

На рисунке приняты следующие обозначения: $x(t)$ – сигнал на входе компенсатора, состоящий из суммы речи – Голос(t) и искаженного за счет прохождения через тракт передачи с передаточной характеристикой $H(\omega)$ сигнала радиостанции VDL mode 4 – $y(t)$. СУММ – сумматор. УА и УУ представлены на рис.3 блоком $H^*(\omega)$, а сам компенсатор состоит из блоков $H(\omega)$ и сумматора. $z(t)$ – выходной сигнал после прохождения компенсатора.

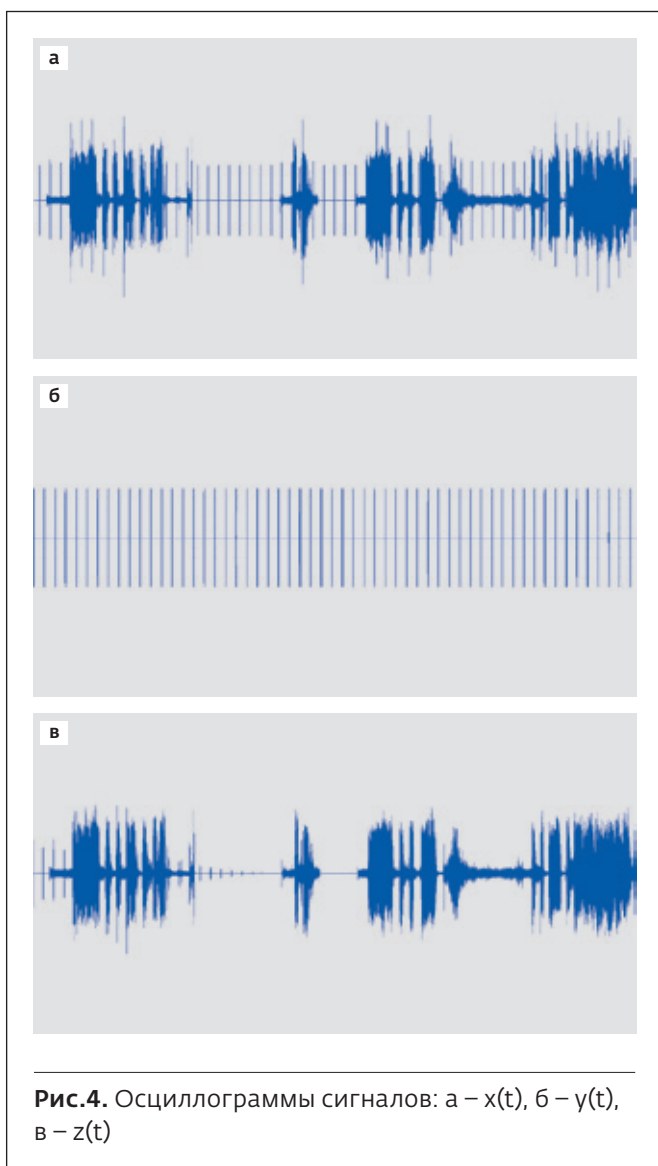
На рис.4 приведены осциллограммы сигналов $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$.

Рис.4 наглядно показывает процесс настройки УА и уменьшения амплитуды помехи.

На рис.5 приведены осциллограммы остаточного сигнала помехи, проникающей в приемный тракт, рассчитанные как

$$e(t) = z(t) - \text{Голос}(t).$$

Из рис.5 видно, что корреляционный алгоритм сходится незначительно дольше, чем НМНСК, в то же время величина ослабления помехи в нем гораздо



выше и составляет до 51,7 дБ, против 36,5 дБ у НМНСК. Применение корреляционного алгоритма адаптации позволяет достичь внесения большего ослабления в помеху, чем при применении алгоритма НМНСК.

В то же время корреляционный алгоритм обладает большей вычислительной сложностью, что затрудняет его применение.

В табл.1 приведено значение ослабления помехи в зависимости от параметров μ и β для корреляционного алгоритма.

Из таблицы видно, что параметр μ практически не влияет на величину максимального ослабления помехи. В то же время параметр β оказывает значительное влияние. Функция $R(\beta)$ имеет один экстремум в точке $0,9 \cdot 10^{-5}$. Максимальное ослабление помехи корреляционным алгоритмом адаптации достигает 53 дБ, при параметрах $\beta = 0,9 \cdot 10^{-5}$, $\mu = 10^{-3}$.

Изложенные положения дают основание констатировать, что автокомпенсатор на основе корреляционного алгоритма может обеспечить необходимый уровень ЭМС VDL mode 4 и УКВ-радиостанции радиотелефонной связи. Применение автокомпенсатора на основе корреляционного алгоритма с параметрами $\beta = 0,9 \cdot 10^{-5}$, $\mu = 10^{-3}$ позволяет внести 53 дБ дополнительного затухания сигнала VDL mode 4.


Выводы

Приемопередатчик VDL mode 4 в процессе своей работы наводит помеху на приемник аналоговой голосовой радиостанции радиотелефонной связи. Помеха выражается в виде неприятного звука – "щелчков" в наушниках у пилота.

Для решения поставленной задачи обеспечения ЭМС можно применить автокомпенсатор.

Применение корреляционного алгоритма адаптации позволяет достичь внесения большего ослабления в помеху, чем при применении алгоритма НМНСК. В то же время корреляционный алгоритм обладает большей вычислительной сложностью, что затрудняет его применение.


Автокомпенсатор на основе корреляционного алгоритма может обеспечить достаточный уровень ЭМС VDL mode 4 и УКВ-радиостанции радиотелефонной связи. Применение автокомпенсатора



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

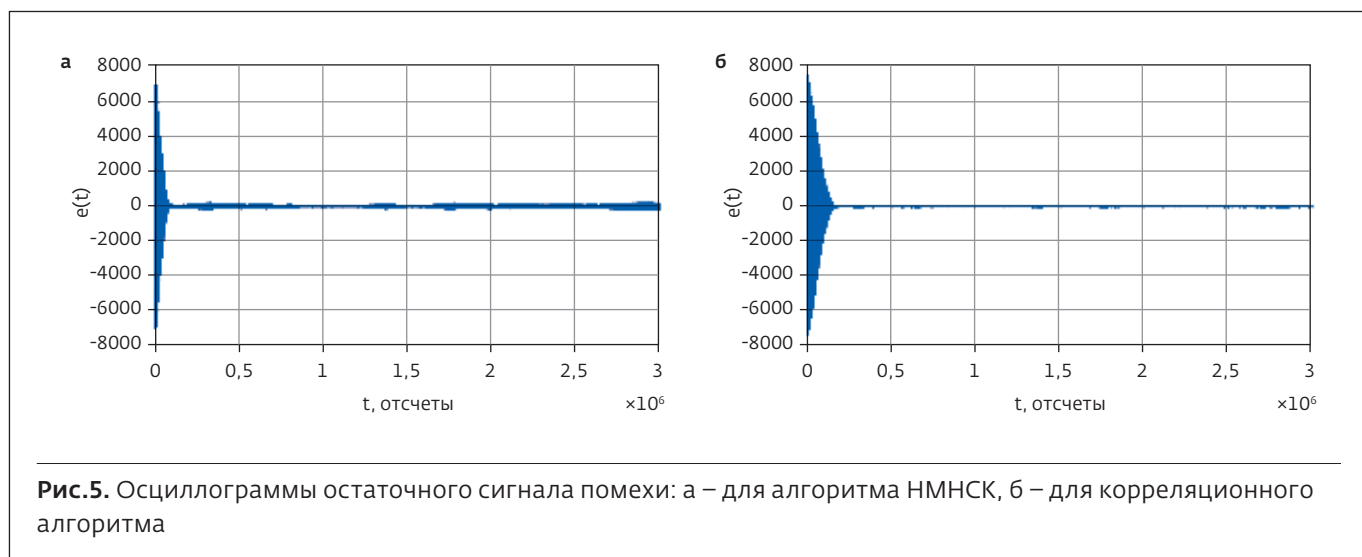


Рис.5. Осциллограммы остаточного сигнала помехи: а – для алгоритма НМНСК, б – для корреляционного алгоритма

Таблица 1. Ослабление помехи автокомпенсатором

μ	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
$R(\mu)$ дБ $\beta = 10^{-5}$	-51	-51	-51	-50	-50
β	10^{-4}	$0,5 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
$R(\beta)$ дБ $\mu = 10^{-3}$	-35	-44	-51	-45	-8

на основе корреляционного алгоритма с параметрами $\beta = 0,9 \cdot 10^{-5}$, $\mu = 10^{-3}$ позволяет внести 53 дБ дополнительного затухания в сигнал VDL mode 4.

Применение автокомпенсатора возможно для обеспечения ЭМС других элементов БРЭО. Однако его внедрение требует проведения исследований, направленных на выбор оптимальных параметров алгоритмов адаптации, для максимального эффективного подавления конкретного сигнала. Импульсные сигналы требуют более быстрого схождения, в то время как при оптимизации параметров алгоритма адаптации под непрерывный сигнал ключевым фактором становится уровень вносимого затухания после окончания процесса адаптации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирошниченко А.В., Татарчук И.А., Фальков Э.Я., Шаврин С.С.** Сравнение пропускной способности систем автоматического независимого наблюдения вещания // ПЕРВАЯ МИЛЯ, 2020. № 3. С. 24-29.
2. **Мирошниченко А.В., Шаврин С.С.** Исследование частотно-селективных характеристик
3. **Мирошниченко А.В.** Применение компенсаторов электрического эха в задачах обеспечения электромагнитной совместимости VDL-4 // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция "Навигация, наведение и управление летательными аппаратами". Тезисы докладов. - М.: ФГУП "ГосНИИАС", 2019. С. 163-164.
4. **Венскаусас К.К.** Компенсация помех в судовых радиотехнических системах. - Л.: Судостроение, 1989. 264 с.
5. **Душин С.В.** Разработка методов повышения эффективности корреляционного принципа компенсационного подавления экосигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Душин Сергей Викторович. - М., 2017. 199 с.
6. **Шаврин С.С.** Развитие теории и техники подавления эффекта электрического эха в телекоммуникациях: дис. ... доктор. техн. наук: 05.12.13 / Шаврин Сергей Сергеевич. - М., 2009. 366 с.

5 юбилейный
международный
форум и выставка

Интеллектуальные транспортные системы России

Цифровая эра транспорта
что? где? когда?

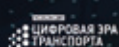
07-08.10.2020

Москва

Azimut Hotel Olympic Moscow

Юбилейный Федеральный форум является ключевой площадкой в России, которая традиционно собирает заказчиков и поставщиков решений в сфере цифровых технологий на транспорте, предоставляет возможности для дискуссий, обмена опытом и консолидации усилий.

8 964 522 09 86 · 8 495 766 51 65 · info@itsrussiaforum.ru · itsrussiaforum.ru



6+

15-17
ОКТЯБРЯ

KRASNOYARSK
DIGITAL
FORUM **it2b[®]**
2020



МВДЦ «Сибирь»
Красноярск, ул. Авиаторов, 19

тел.: (391) 200-44-29
www.krasfair.ru