

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМНОЙ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ РАДИОСТАНЦИЙ С ПОЗИЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНУТРИОБЪЕКТОВОЙ ЭМС

А. А. Водчиц¹, С. В. Козлов²

¹Открытое акционерное общество «АГАТ-СИСТЕМ», Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Минск, Беларусь

Аннотация. Предоставлены экспериментальные результаты по взаимному влиянию радиосредств в условиях их размещения на компактном подвижном объекте. Приведены уровни интермодуляционных продуктов, возникающих при одновременной работе двух и более передатчиков радиосредств. С использованием имитационного моделирования выполнена оценка вероятности блокирования приемника продуктами взаимной интермодуляции передатчиков.

Ключевые слова: интермодуляция, электромагнитная совместимость, группа радиосредств.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF INTERMODULATION IN POWER AMPLIFIERS OF SOFTWARE DEFINED RADIO'S FROM THE POINT OF PROVIDING AN IN-HOUSE EMC.

A. A. Vodchyts¹, S. V. Kozlov²

¹Open joint stock company AGAT-SYSTEM, Minsk, Belarus

²Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract. Experimental results are given on the relative influence of radios when operating in conditions of their placement on a compact mobile object. The levels of intermodulation products that occur when two or more radio transmitters are operated simultaneously, as well as frequency planning of objects containing several programmable radios in their structure by creating a simulation model are given.

Keywords: intermodulation, electromagnetic compatibility, a group of radio equipment.

1. ВВЕДЕНИЕ

Подвижные объекты тактического звена управления с позиций обеспечения связи, как правило, характеризуются большим количеством радиоэлектронного оборудования (в том числе связного), размещенного в пределах относительно небольшой площади самого объекта. Ориентировочные размеры объектов, в большинстве случаев, не превышают 4х2 м. Небольшие размеры объектов обуславливают необходимость работы радиостанций узла связи на близко расположенные антенны (ближняя зона антенн), или на одну антенну с помощью развязывающих устройств (антенных фильтров). Число радиосредств, как правило, не превышает пяти единиц, при этом средняя интенсивность работы на передачу одного из них достигает 100%, а остальных – 20%. При подобной интенсивности часто возникает ситуация одновременной работы на передачу нескольких радиосредств (двух и более). При этом возникает эффект перемножения (интермодуляции) в выходных трактах радиостанций как результат проникновения в

них радиосигналов соседних передатчиков. В результате, в излучаемом антеннами объекта спектре, появляются новые радиочастотные составляющие высокой мощности – побочные колебания интермодуляционного типа. Данные составляющие попадают на входы радиосредств, находящихся в режиме приема, с вероятностью попадания в полосу пропускания входной селекции (1-2 % от частоты настройки). Как следствие, радиосредства работают в сложной электромагнитной обстановке. Данная электромагнитная обстановка обуславливает определенный уровень требуемых параметров радиостанций, позволяющих им работать в составе подобных объектов.

Выходная мощность радиосредств для подвижных объектов составляет десятки ватт (43–50 дБ/мВт). Избирательность приемников по блокированию в полосе пропускания преселектора составляет 85-100 дБ [2]. Чувствительность радиостанций УКВ диапазона в среднем составляет минус 110 дБ/мВт (0,7 мкВ). Учитывая вышеуказанные параметры, динамический диапазон мощностей на объекте достигает 160 дБ. Современные программно определяемые радиостанции ориентированы на использование цифровых режимов работы, в том числе режимов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Учитывая все обстоятельства, очевидна проблематика обеспечения внутриобъектовой ЭМС.

Меры по оптимизации ЭМС объекта делятся на технические (оптимизация усилителей мощности, фильтрация, экранирование, увеличение межантенной развязки) и организационные (частотное планирование, временная синхронизация). Для определения методов и степени принятия данных мер необходимо получить экспериментальные данные, отражающие качественные параметры радиосредств, по возникающим в выходных трактах побочных колебаниях интермодуляционного типа.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Базовым с позиций анализа интермодуляционных эффектов является вариант совместной работы трех радиосредств, два из которых работают в режиме передачи, и одно – в режиме приема. Взаимная развязка γ антенн радиосредств подвижного объекта в зависимости от частоты и расстояния между антеннами принимает значения $\gamma=15...40$ дБ (рисунок 1). В зависимости от степени экранирования антенн из-за особенностей конструкции объекта, взаимная развязка может изменяться на 5...10 дБ [1]. При этом мощность, поступающая в выходные каскады передатчика от соседнего радиосредства, достигает нескольких ватт. При одновременной работе двух передатчиков их выходные радиосигналы взаимно поступают на входы соседних радиосредств и, попадая на выходные каскады усилителей мощности, генерируют новые составляющие интермодуляционного типа (рисунок 2). Данные составляющие, находясь в частотной отстройке от 10% способны беспрепятственно попадать в передающие антенны.

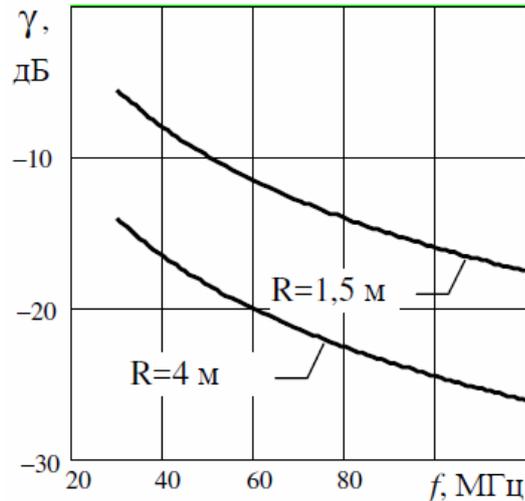


Рис. 1. Теоретическая зависимость взаимной развязки антенн от частоты и расстояния

Очевидно, что уровень интермодуляционных искажений, возникающих в данном случае, будет определять необходимую избирательность по блокированию в полосе пропускания преселектора радиосредства, находящегося в режиме приема. Полное совпадение частоты интермодуляционного продукта с частотой приема исключается при соответствующем частотном планировании работы подобных объектов [4].

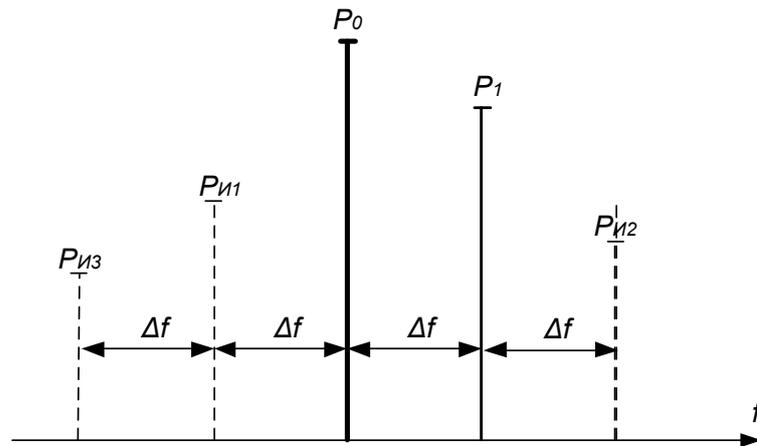


Рис. 2. Пример возникающих интермодуляционных искажений ($P_{и}$) при совместной работе радиопередатчиков (P_0 и P_1)

Для частот интермодуляционных продуктов имеем $f_{m,n} = |mf_1 - nf_2|$ для всех возможных значений индексов m, n . Например $f_1=30$ МГц; $f_2=33$ МГц, откуда $f_{2,1} = 2 \cdot 30 - 33 = 27$ МГц; $f_{1,2} = |1 \cdot 30 - 2 \cdot 33| = 36$ МГц; $f_{3,2} = |3 \cdot 30 - 2 \cdot 33| = 24$ МГц, $f_{2,3} = |2 \cdot 30 - 3 \cdot 33| = 39$ МГц и так далее. Как правило мощность продуктов седьмого, девятого и т.д. порядков очень мала и не вызывают ощутимых проблем [5].

Выходной тракт программно определяемых радиостанций, вследствие широкого диапазона рабочих частот (от нескольких октав), имеет в своем составе блок

переключаемых фильтров низкой частоты (фильтров гармоник). На каждом из фильтров радиостанция работает в диапазоне частот с перекрытием 1,4 – 1,7. Данные фильтры, помимо подавления высших гармонических составляющих, генерируемых в усилителях мощности, блокируют попадание к усилителю сигналов соседних радиосредств, работающих на частотах значительно выше его рабочей частоты (в 2 и более раза). А также в случае генерации интермодуляционного продукта частотой в 2 и более раза превышающего рабочую частоту – фильтр блокирует его прохождение в антенну. Следовательно – структура выходного тракта достаточно эффективно борется с возникновением интермодуляционных искажений при отстройке соседнего радиосредства на октаву и далее. Но плотность расположения радиосредств на объекте не позволяет выделить настолько широкие диапазоны работы всем радиостанциям. Поэтому частотное планирование подразумевает использование частот соседних средств связи в отстройке от 10%.

Для исследования эффекта взаимной интермодуляции были произведены измерения спектра на выходе исследуемых передающих трактов трех типов. Измерения проводились при воздействии «мешающего» сигнала от усилителя через развязывающий симметричный аттенюатор с затуханием 17 дБ, имитирующий межантенную развязку (рисунок 3). В состав измеряемого усилителя и усилителя «помехи» входили фильтры низкой частоты (ФНЧ).



Рис. 3. Схема измерительного стенда.

Усиленные сигналы от исследуемого и «мешающего» усилителей нагружены на симметричный аттенюатор. Ответвитель является ненаправленным делителем напряжения.

Измерения произведены с тремя типами усилителей: двухтактным на LDMOS транзисторе BLF647P, двухтактным на LDMOS транзисторах BLF574 со схемой суммирования четырех ячеек и одноктактным на MOS транзисторе BLF245. Измерения статичного спектра производились при частоте основного сигнала усилителя $f_1 = 30$ МГц и частоте мешающего сигнала $f_2 = 33$ МГц. Измерения спектра в режиме сохранения максимальных значений при перестройке генератора помехи производились при частоте основного сигнала усилителя $f_1 = 30$ МГц и перестройке мешающего генератора f_2 в диапазоне 30-40 МГц.

На рисунке 5 можно наблюдать полную огибающую наиболее мощного интермодуляционного продукта $f_{2,1}$. Огибающие интермодуляционных продуктов $f_{1,2}$ и $f_{3,2}$ неполные – а именно, не включают участки, полученные при перестройке мешающего генератора в диапазоне 30-35 МГц, вследствие перекрытия этих участков более мощными составляющими спектра – мешающим сигналом и интермодуляционным продуктом $f_{2,1}$.

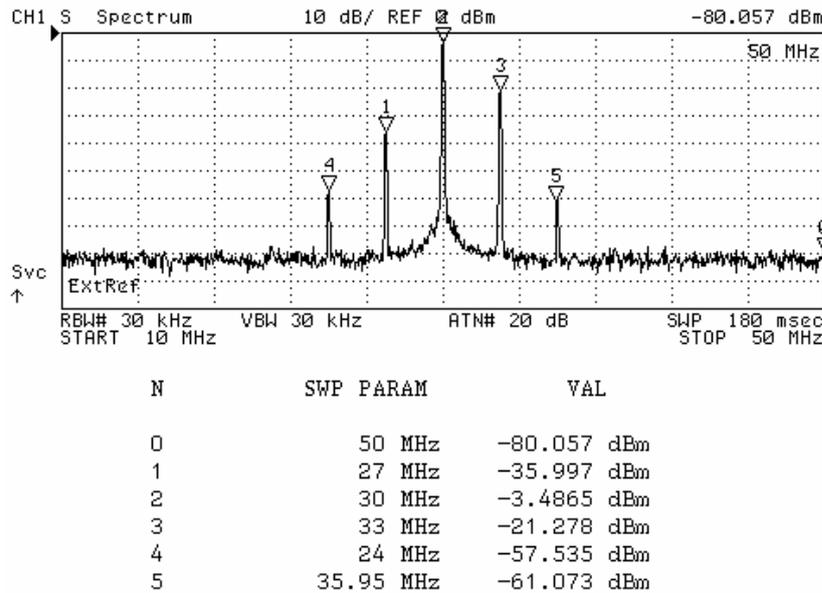


Рис. 4. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторе BLF647P (входная мощность усилителя 25 Вт, мощность мешающего сигнала 40 Вт)

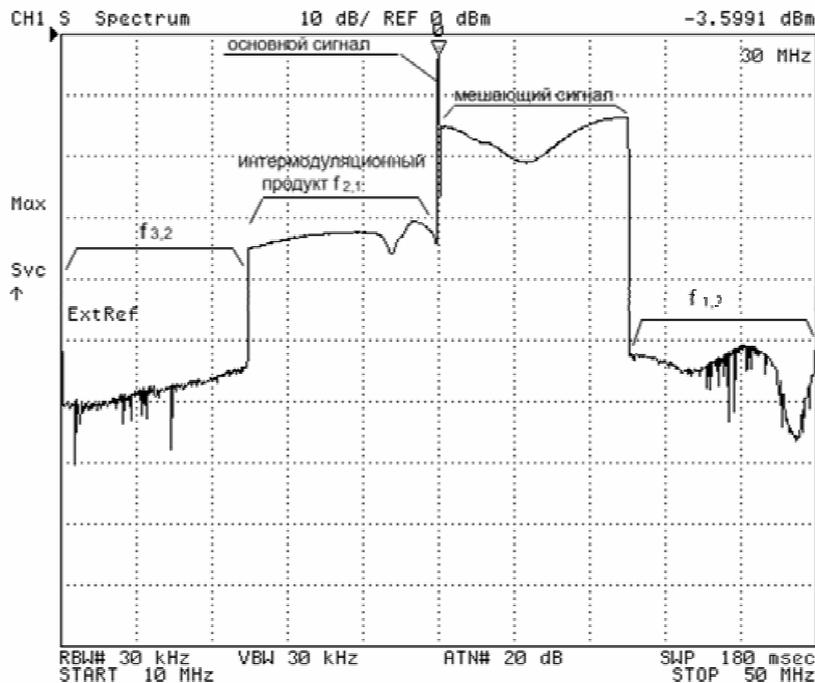


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторе BLF647P в режиме сохранения максимальных значений (перестройка генератора помехи в диапазоне 30-40 МГц; входная мощность усилителя 25 Вт, мощность мешающего сигнала 40 Вт)

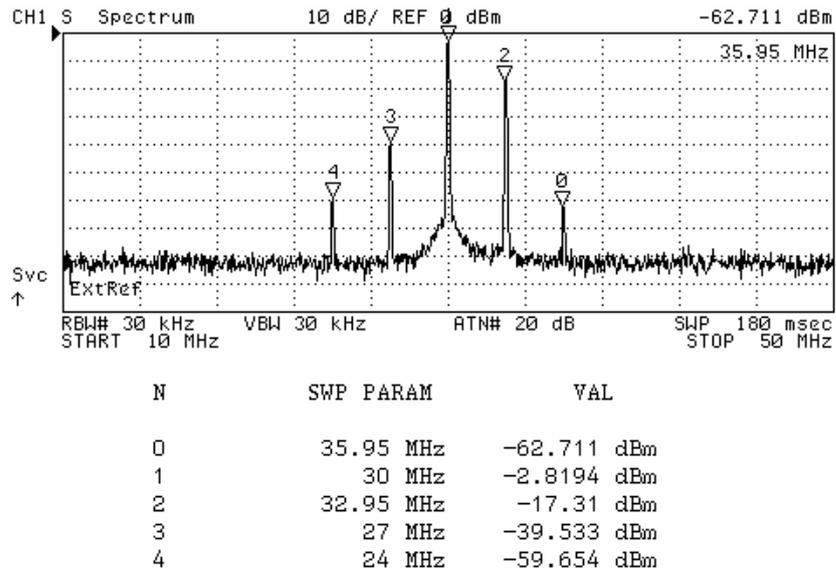


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторах BLF574 (выходная мощность усилителя 25 Вт, мощность мешающего сигнала 40 Вт)

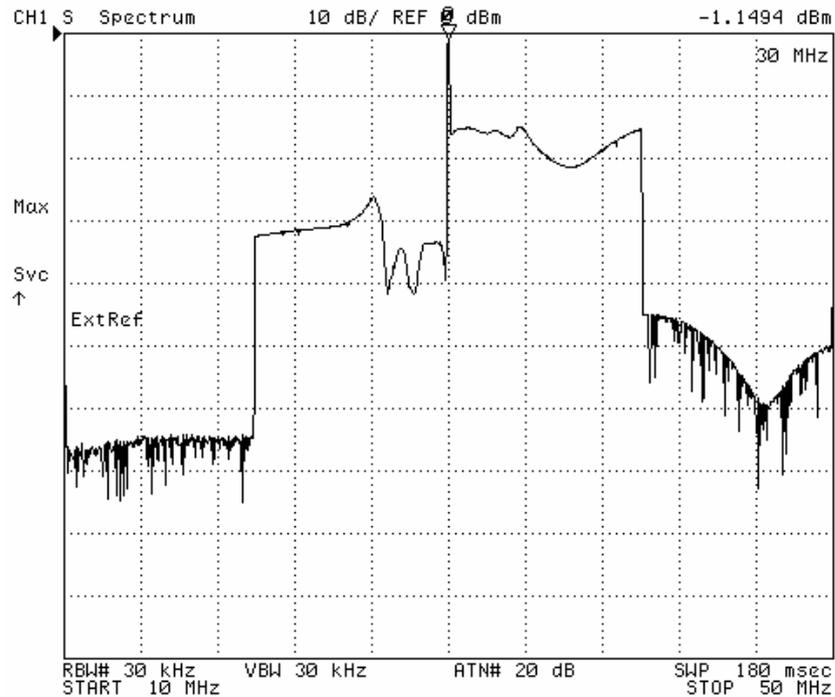


Рис. 7. Спектр сигнала на выходе двухтактного усилителя на транзисторах BLF574 в режиме сохранения максимальных значений (перестройка генератора помехи в диапазоне 30-40 МГц; входная мощность усилителя 25 Вт, мощность мешающего сигнала 40 Вт)

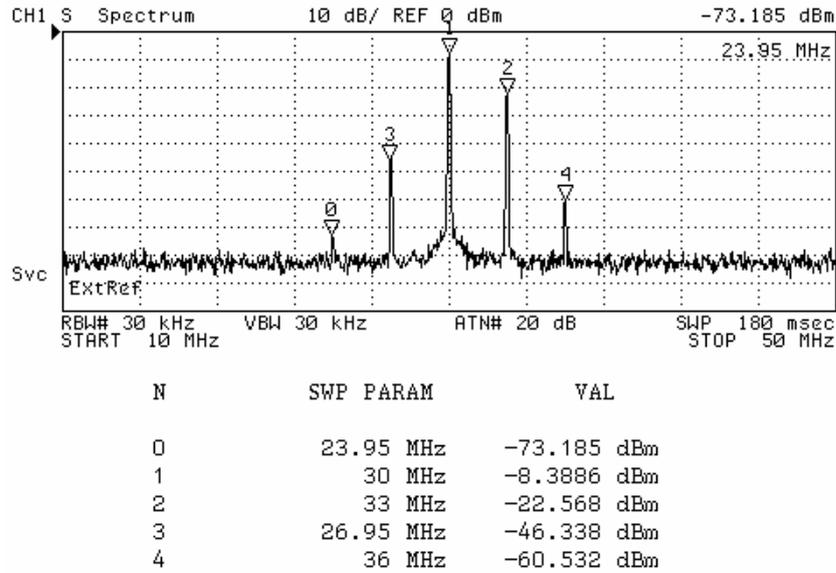


Рис. 8. Спектр сигнала на выходе одноконтурного усилителя на транзисторе BLF245 (выходная мощность усилителя 8 Вт, мощность мешающего сигнала 10 Вт)

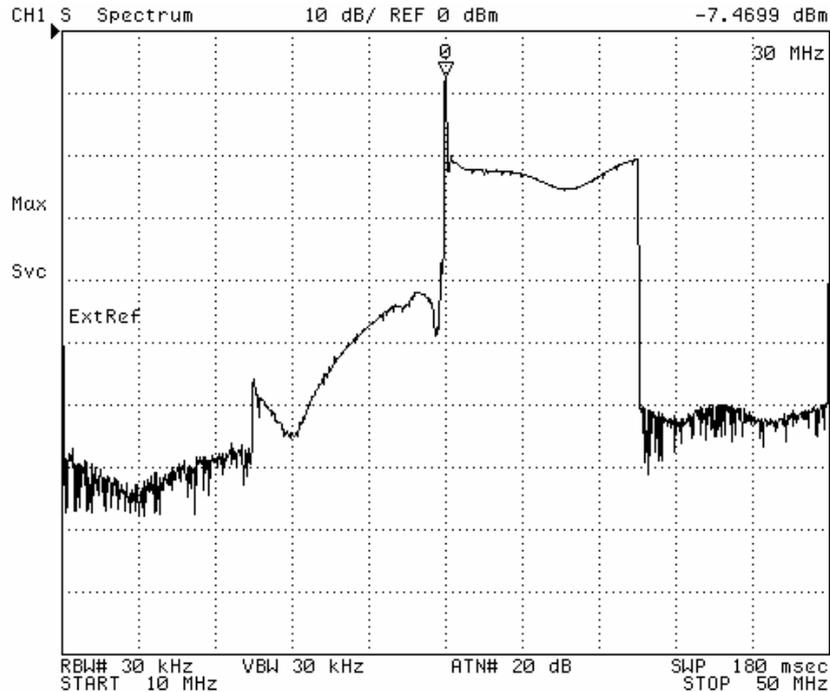


Рис. 9. Спектр сигнала на выходе одноконтурного усилителя на транзисторе BLF245 в режиме сохранения максимальных значений (перестройка помехи в диапазоне 30-40 МГц; выходная мощность усилителя 8 Вт, мощность мешающего сигнала 10 Вт)

Как видно из полученных спектрограмм, уровень возникающих интермодуляционных продуктов имеют достаточно выраженную частотную зависимость. Мощность продуктов интермодуляции не зависит от выходной мощности исследуемого усилителя до момента, когда мощности полезного и мешающего сигналов в точке измерения не становятся сравнимыми. При этом, изменяя мощность мешающего сигнала, мощность интермодуляционных продуктов изменяется строго пропорционально. Поэтому целесообразно приводить результаты измеренных

мощностей интермодуляционных продуктов именно относительно мешающего сигнала (Таблица 1).

Таблица 1. Относительные уровни мощности интермодуляционных продуктов.

Исследуемый усилитель	Мощность интермодуляционных составляющих относительно сигнала помехи в точке измерения (при частотной отстройке 10 %), дБ		
	f_{21}	f_{12}	f_{32}
BLF647P	-14,7	-39,7	-36,2
BLF574x4	-22,2	-45,4	-42,3
BLF245	-23,7	-37,9	-50,5

Рассмотрим пример работы трех средств связи на одном объекте при взаимном частотном разnose в 10 % (рисунок 10). Примем значение межантенной развязки равным 15 дБ. Мощности радиосредств примем равными мощностям при измерениях спектрограмм. При измеренных параметрах усилителя на транзисторе BLF647P ориентировочное значение мощности интермодуляционного продукта f_{21} во входных цепях приемника равно 1,6 дБ/мВт.

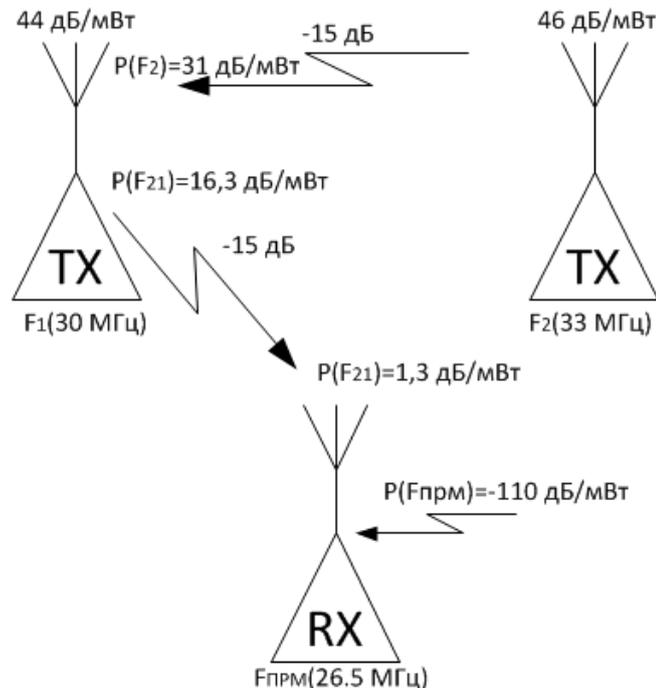


Рис. 10. Иллюстрация взаимного влияния трех средств связи при их размещении на объекте

При упомянутой выше чувствительности приемников в минус 110 дБ/мВт, мощность помехи превышает полезный сигнал более чем на 110 дБ. С учетом близкого частотного расположения помехи и полезного сигнала (27 и 26,5 МГц соответственно) можно утверждать, что в приемнике возникнет эффект блокирования (учитывая избирательность по блокированию, составляющую 85–100 дБ), вследствие чего дальность связи существенно снизится.

3. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЛОКИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценка вероятности блокирования радиоприемного устройства, при совместной работе нескольких передатчиков на подвижном объекте, из-за взаимной интермодуляции исследовалась методом имитационного математического моделирования. Процедура имитационного моделирования включала:

розыгрыш текущих рабочих частот $f_i^{(1)}$, $f_i^{(2)}$ передатчиков радиосредств $f_i^{(1)} = f_{\min}^{(1)} + \Delta f \cdot \xi_i$; $f_i^{(2)} = f_{\min}^{(2)} + \Delta f \cdot \eta_i$ и текущей рабочей частоты $f_i^{(r)} = f_{\min}^{(r)} + \Delta f \cdot \psi_i$ приемника радиосредства, где $i = \overline{1, I_{\max}}$ - номер реализации; $f_{\min}^{(1)}, f_{\min}^{(2)}$ - минимальные рабочие частоты сетки частот первого и второго передатчика; $f_{\min}^{(r)}$ - минимальная рабочая частота сетки частот приемника; Δf - шаг сетки частот; ξ_i, η_i, ψ_i - независимые равномерно распределенные на интервале $[0, N_f]$ случайные числа, округленные до наименьшего целого; N_f - число частот; при это проверялось выполнение условия $|f_i^{(1)} - f_i^{(2)}| > 0,1 \cdot \min(f_i^{(1)}, f_i^{(2)})$, при невыполнении которого розыгрыш $f_i^{(2)}$ повторялся;

расчет частот продуктов при взаимной интермодуляции передатчиков $f_{12} = 2f_{\min}^{(2)} - f_{\min}^{(1)}$, $f_{21} = 2f_{\min}^{(1)} - f_{\min}^{(2)}$; $f_{23} = 3f_{\min}^{(2)} - 2f_{\min}^{(1)}$ и $f_{32} = 3f_{\min}^{(1)} - 2f_{\min}^{(2)}$ и ослаблений $\gamma_{12(21,23,32)_i} = K(|f_{12(21,23,32)} - f_i^{(r)}|)$ интермодуляционных продуктов в преселекторе приемника;

расчет мощностей $P_{12(21,23,32)_i}$ интермодуляционных продуктов на входе входного маломощного усилителя приемника (в соответствии с [3], этот элемент рассматривался как основной источник блокирования) для рассчитанных значений $\gamma_{12(21,23,32)_i}$, развязок антенн и экспериментальных значений относительных мощностей интермодуляционных продуктов (таблица 1); расчет суммарной мощности интермодуляционных продуктов $P_{\text{им}}^{(i)} = P_{12_i} + P_{21_i} + P_{23_i} + P_{32_i}$;

проверку выполнения условия блокирования приемника в i -ой реализации: если $P_{\text{им}}^{(i)} > P_{\min} + \Delta B$, где P_{\min} - чувствительность приемника; ΔB - динамический диапазон приемника по блокированию.

Результаты оценки частоты блокирования $w = I_{\text{бл}} / I_{\max}$, где $I_{\text{бл}}$ - число реализаций, в которых наблюдалось блокирование приемника в виде зависимости вероятности w от относительного разнеса частот передатчиков и приемника

$\delta = \frac{f_{\min}^{(r)} - f_{\min}^{(1(2))}}{f_{\min}^{(r)}}$ при $f_{\min}^{(1)} = f_{\min}^{(2)}$ приведены на рисунке 2. При проведении оценок

принималось: мощности передатчиков 25 Вт; $\Delta f = 50$ кГц; $N_f = 128$; $f_{\min}^{(r)} = 50$ МГц;

$P_{\min} = -110$ дБМВт; $\Delta B = 85$ дБ; избирательность преселектора принималась равной 0 дБ при частотной отстройке $\pm 2\%$; минус 30 дБ при частотной отстройке $\pm 10\%$ и минус 50 дБ при частотной отстройке свыше $\pm 10\%$; диапазон изменения параметра δ выбирался исходя из исключения блокирования приемника работающими передатчиками; средняя развязка между антеннами на подвижном объекте принималась равной 20 дБ.

Как видно из результатов расчетов, вероятность блокирования при наличии взаимной интермодуляции передатчиков радиосредств на подвижном объекте тактического звена управления может достигать 0,3...0,6. Устранение влияния взаимной интермодуляции может быть достигнуто при частотном планировании применения радиосредств. Однако это может привести к существенному сужению диапазона программной перестройки частоты радиосредств (в частности, для получения вероятности блокирования менее 0,1 относительная расстройка должна быть не менее 0,3) и снижению помехозащищенности радиостанций, размещаемых на подвижном объекте, в условиях радиоэлектронного подавления.

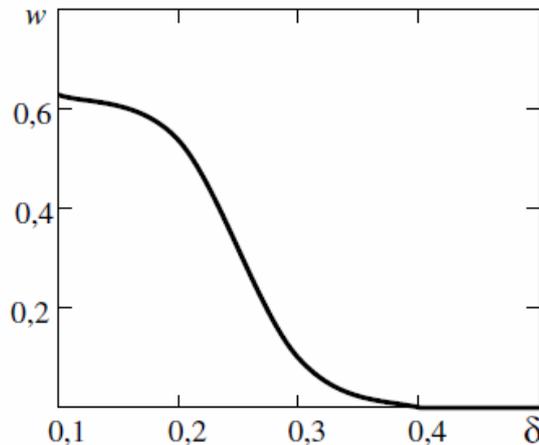


Рис. 11. Зависимость вероятности блокирования от относительной расстройки между передатчиками и приемником.

Данная зависимость построена для объекта, содержащего в своем составе 3 радиосредства. При использовании большего количества радиостанций, вероятность блокирования приемников резко возрастает.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования и результаты моделирования свидетельствуют о необходимости изыскания структурных и схемотехнических решений а также принятия организационных мер для обеспечения эффективного совместного функционирования с учетом возникающих побочных колебаний интермодуляционного типа между соседними передающими радиосредствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Study of the isolation between VHF land mobile radio antennas in close proximity. Report International Telecommunication Union (ITU-R) M.2141, 2009.

2. Сухопутная подвижная служба. Устройства радиосвязи, работающие в полосе частот от 30 до 1000 МГц. Требования и методы измерений: СТБ 1200-99 – введ. 01.07.2000. Минск, 2000.
3. Статистическая теория электромагнитной совместимости радио электронных средств / под ред. В. Я. Аверьянова. – М.: Наука и техника. 1984. – 215 с.
4. Акиншин Н.С. Математическая модель оценки радиоэлектронной обстановки и алгоритм выбора рабочих частот группировки радиоэлектронных средств // Антенны, 2017, №11. – С. 39-43.
5. Интермодуляция между близко расположенными передатчиками [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://procom.dk/de/intermodulation-concepts/intermodulation-between-closely-spaced-transmitters>

REFERENCES

1. Study of the isolation between the land mobile radio antennas in close proximity. Report by International Telecommunication Union (ITU-R) M. 2141, 2009.
2. Land mobile service. Radio communication devices operating in the frequency band from 30 to 1000 MHz. Requirements and methods of measurement: STB 1200-99 – Vved. 01.07.2000. Minsk, 2000.
3. Statistical theory of electromagnetic compatibility of radio-electronic means / under the editorship of V. Y. Averyanova. - M.: Science and technology. 1984. - 215 p.
4. Akinshin N. With. A mathematical model for estimation of radio electronic situation and algorithm of the choice of operating frequency groupings of electronic equipment // Antennas, 2017, No. 11. – P. 39-43.
5. Intermodulation between closely spaced transmitters [Electronic resource] - access Mode: <http://procom.dk/de/intermodulation-concepts/intermodulation-between-closely-spaced-transmitters>