

УДК 623.623

АЛГОРИТМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ РАДИОСТАНЦИЙ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

А.Л. МАТЮШКОВ, В.О. СЕНЮК, К.В. СТУПИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 февраля 2018

Аннотация. Разработан алгоритм подавления тактических радиостанций с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Дана оценка эффективности воздействия полигармонических немодулированных помех на радиотракт радиостанции с ППРЧ.

Ключевые слова: алгоритм, интермодуляция, помеха, радиостанция, сигнал.

Abstract. The algorithm for suppressing tactical radiostations with frequency-hopping spread spectrum (FHSS) was developed. The effectiveness impact of polyharmonic unmodulated interference on the radiotransmission of a radio station with FHSS was estimated.

Keywords: algorithm, intermodulation, interference, radiostation, signal.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 5-10

**The algorithm of radioelectronic suppression
of radiostations with frequency-hopping spread spectrum**

A.L. Matyushkov, V.O. Senyuk, K.V. Stupin

Введение

В современных системах связи (СС) в интересах повышения надежности, помехозащищенности и разведзащищенности существуют линии радиосвязи (ЛРС), использующие режим ППРЧ. Анализ помехоустойчивости ЛРС передачи дискретных сообщений с ППРЧ свидетельствует о высоком потенциале при использовании их в системах связи в условиях применения противником средств радиоэлектронного подавления. В настоящее время ЛРС с ППРЧ активно внедрены в системы связи тактического назначения и являются основой информационного обеспечения и управления войсками. Для подавления средств связи с ППРЧ необходимы станции активных помех (САП). Для разработки таких станций необходим эффективный алгоритм подавления ППРЧ.

Для постановления помех закон перестройки несущей частоты в СС с ППРЧ неизвестен, что исключает возможность создания эффективных способов подавления. Фундаментальный принцип псевдослучайности сигналов препятствует системе радиоэлектронного подавления (РЭП) добиваться эффективного воздействия на СС с ППРЧ организованных помех. Это вынуждает систему РЭП с ограниченной мощностью передатчика распределять соответствующим образом спектральную плотность мощности помехи по частотному диапазону СС.

Наиболее перспективным направлением является РЭП на основе известного явления интермодуляции, возникающего при взаимодействии на нелинейных элементах входных цепей приемного тракта двух или более сигналов [1]. Если частота полезного сигнала f_1 , а помехи f_2 , то в канале приема появляются паразитные интермодуляционные сигналы

с частотами $f_1 - f_2$, $f_1 + f_2$, $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$, $3f_1 - 2f_2$, $3f_2 - 2f_1$ и так далее. При возрастании количества взаимодействующих сигналов на входе приемника происходит лавинообразный процесс формирования интермодуляционных составляющих. Например, взаимодействие трех сигналов с частотами f_1 , f_2 , f_3 вызывает появление комбинационных составляющих 3-го порядка с частотами $f_1 + f_2 - f_3$, $f_1 + f_3 - f_2$, $f_2 + f_3 - f_1$, $f_1 + f_2 + f_3$. Как показано в [2], работа в одном частотном диапазоне десяти радиопередающих устройств приводит к возникновению 100 интермодуляционных излучений 2-го порядка, 800 – 3-го порядка, 4000 – 4-го порядка и 15000 – 5-го порядка.

Результатом воздействия на приемный тракт таких помех в зависимости от их мощности может быть:

- попадание помехового сигнала или интермодуляционной составляющей в полосу полезного сигнала, что приведет к полному либо частичному подавлению;
- блокирование – изменение уровня полезного сигнала или отношения сигнал-шум на выходе радиоприемника, при этом частота помехи не совпадает с частотами основного и побочных каналов;
- перекрестное искажение – взаимодействие на нелинейных элементах входной цепи приемника спектральных составляющих сигнала и помехи;
- одновременное существование вышеуказанных эффектов.

В целом исследование воздействия интермодуляционных составляющих на радиоприемный тракт при постановке преднамеренных помех представляется весьма сложной задачей. Для оценки степени данного воздействия были проведены эксперименты, моделирующие влияние на радиоприемный тракт узкополосных немодулированных гармонических помех.

При проведении исследований использовалась лабораторная установка, состоящая из анализатора спектра Agilent N9320A, трех генераторов сигналов Г4-222, одного генератора сигнала Agilent E4438C и сумматора сигналов, имеющего в своем составе типовой транзисторный каскад, имитирующий работу ВЧ усилителя ППРЧ радиостанции.

Анализ экспериментальных данных

Известно, что в УКВ радиостанциях, использующих ППРЧ, весь диапазон от 30 до 108 МГц разбит на поддиапазоны. С целью оптимизации эксперимента исследования проводились в одном поддиапазоне, так как в других поддиапазонах все происходит аналогично. В качестве полезного радиосигнала и помех использовались гармонические немодулированные сигналы с шириной спектра по основному лепестку 12,5 кГц в частотном диапазоне от 30 до 40 МГц (рис. 1, 2), которые генерировались генераторами сигналов Г4-222 и генератором Agilent E4438C.

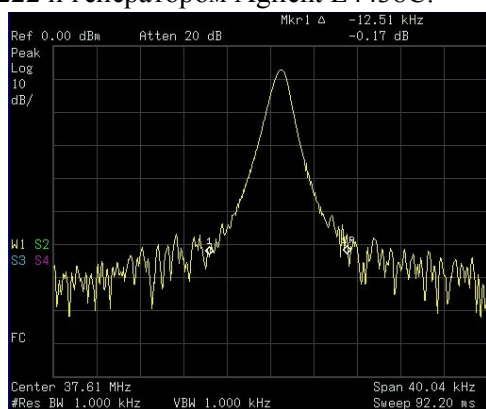


Рис. 1. Спектр радиосигнала с несущей частотой $f = 37,609$ МГц

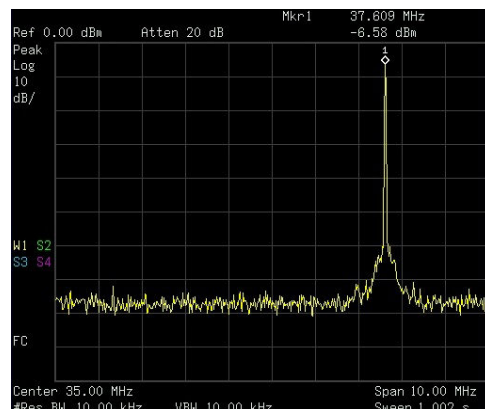


Рис. 2. Полезный сигнал в диапазоне от 30 до 40 МГц

На рис. 3–5 представлены спектры при воздействии на радиоприемный тракт, принимающий полезный сигнал с частотой $f \approx 37,609$ МГц, одной (частота $f_{n1} = 35,739$ МГц),

двух (частота $f_{n1} = 35,739$ МГц, $f_{n2} = 34,326$ МГц), трех (частота $f_{n1} = 35,739$ МГц, $f_{n2} = 34,326$ МГц, $f_{n3} = 31,326$ МГц) помех с одинаковой мощностью относительно мощности сигнала.

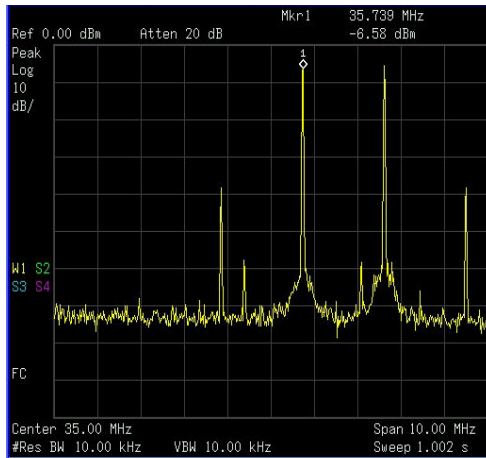


Рис. 3. Полезный сигнал, помеха и интермодуляционные составляющие

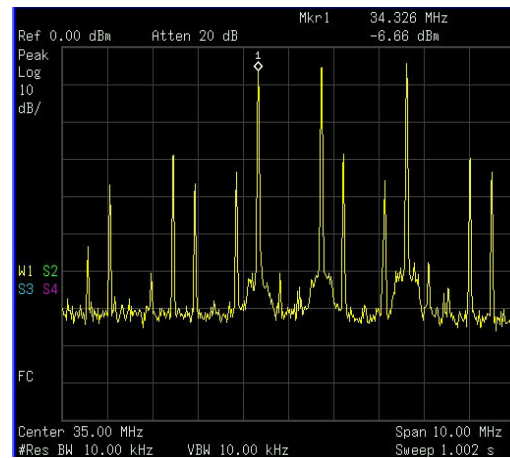


Рис. 4. Полезный сигнал, две помехи и интермодуляционные составляющие

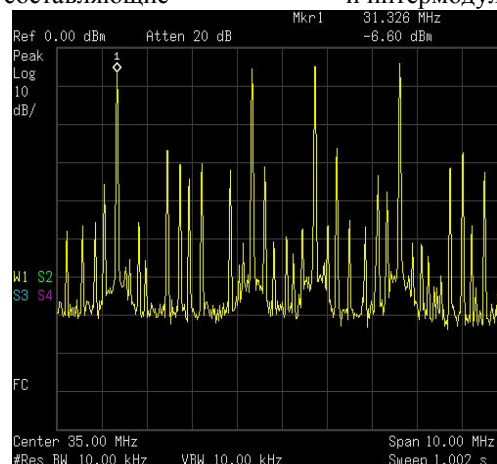


Рис. 5. Полезный сигнал, три помехи и интермодуляционные составляющие

На рис. 6, 7 представлены спектры полезного сигнала и трех помех с мощностью сигнала, большей на 3 дБм относительно мощности помех и меньшей на 3 дБм относительно мощности помех соответственно. Частота сигнала $f = 37,609$ МГц, частота помех $f_{n1} = 35,739$ МГц, $f_{n2} = 34,326$ МГц, $f_{n3} = 31,326$ МГц.

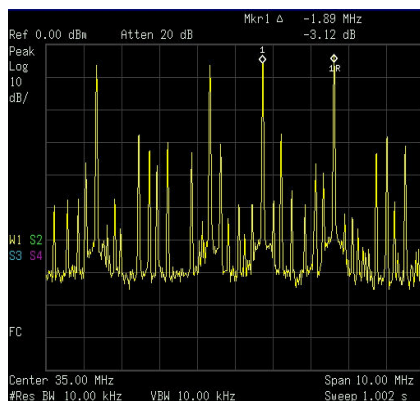


Рис. 6. Мощность полезного сигнала, большая на 3 дБм по сравнению с мощностью помех

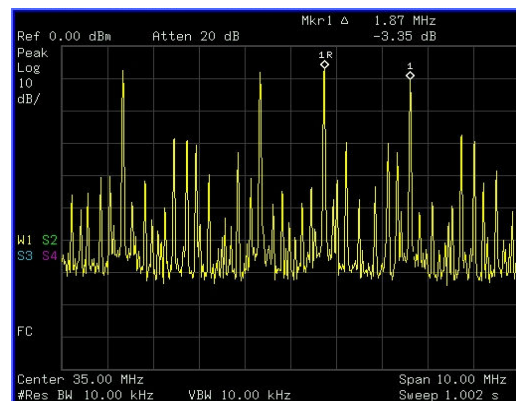


Рис. 7. Мощность полезного сигнала, меньшая на 3 дБм по сравнению с мощностью помех

Оценка эффективности воздействия помех на радиотракт и расположения помех относительно частоты сигнала проводилась с помощью функции «Power Spectral Density» анализатора спектра. В результате установлено, что шумы в радиотракте возрастают с увеличением количества помех, достигая величины +6,64 дБм при воздействии на полезный сигнал 3 помех (рис. 8–11).

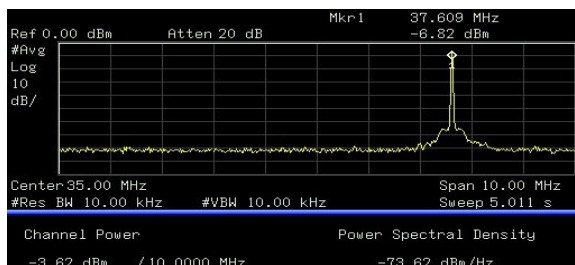


Рис. 8. Спектральная плотность полезного сигнала

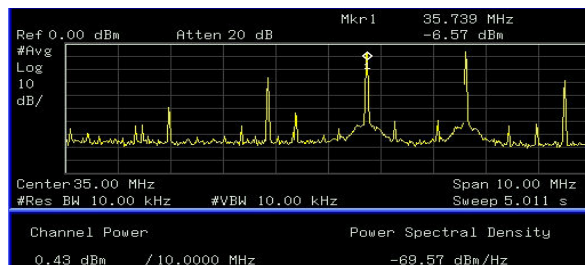


Рис. 9. Спектральная плотность полезного сигнала, помехи и 14 интермодуляционных составляющих

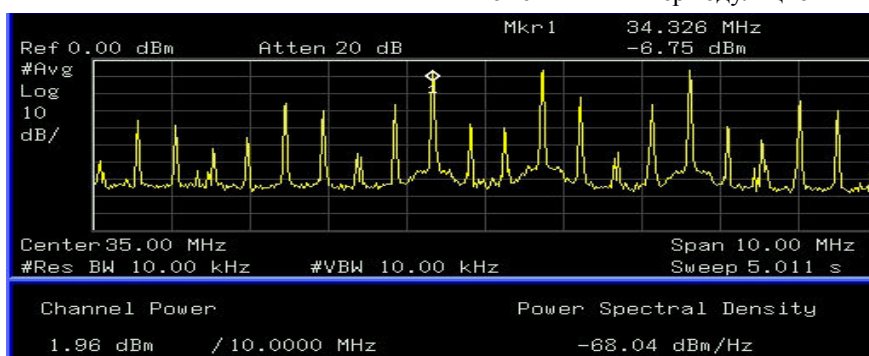


Рис. 10. Спектральная плотность полезного сигнала, двух помех и 19 интермодуляционных составляющих

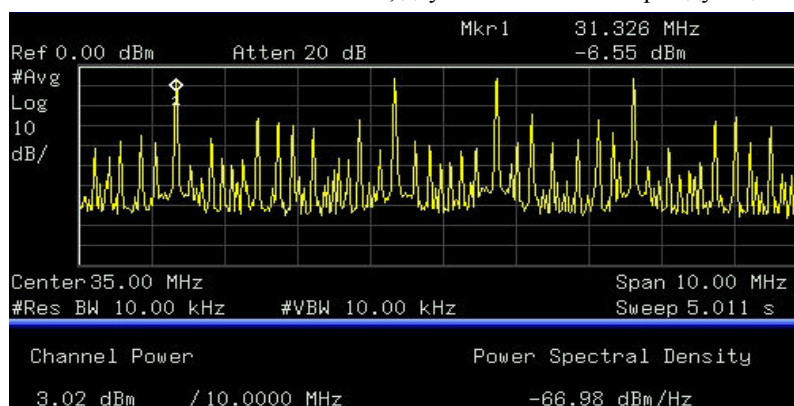


Рис. 11. Спектральная плотность полезного сигнала, трех помех и 73 интермодуляционных составляющих

В [3] показано, что отношение энергии сигнала при передаче одного бита информации к спектральной плотности шума в системах связи с ППРЧ в отсутствии помех должно быть не менее 13,35 дБ для обеспечения средней вероятности ошибки не более 10^{-4}

Возрастание, в нашем случае, спектральной плотности шума на 6,5 дБм при воздействии трех помеховых сигналов приводит к необходимости увеличения мощности полезного сигнала приблизительно в 4 раза для передачи цифровых данных без искажений и потерь.

В работе [4] представлены расчеты, позволяющие оценить вероятность блокировки канала промежуточной частоты приемника полезного радиосигнала. Если принять, что фильтр канала промежуточной частоты имеет полосу в 25 кГц, то тогда количество каналов системы связи для диапазона шириной 10 МГц составляет
$$N = \frac{10000 \text{ кГц}}{25 \text{ кГц}} = 400.$$

Количество основных помех и их интермодуляционных составляющих

в спектре (рис. 11) ориентировочно составляет $j = 3 + 73 = 76$. Тогда вероятность поражения рассматриваемого рабочего канала системы связи с ППРЧ составляет $S = \frac{j}{N} = \frac{76}{400} = 19 \cdot 10^{-2}$, что является недопустимым для передачи цифровых данных без искажения.

Алгоритм радиоэлектронного подавления

Анализ экспериментальных исследований позволяет разработать алгоритм радиоэлектронного подавления тактических радиостанций противника с ППРЧ без определения их количества и используемых рабочих частот.

В общем случае при подавлении группировки систем радиосвязи противника (СРС) в приемном тракте каждой радиостанции будет формироваться сложный сигнал от взаимодействия полезных сигналов и помех: от станций РЭП и случайных сигналов радиостанций, ведущих радиообмен в районе боевых действий. Результатом этого взаимодействия будет избыточный широкополосный шум, который, кроме собственных шумов приемника, содержит интермодуляционные составляющие внеполосных помех.

В качестве сигналов станций РЭП целесообразно использовать мобильные радиостанции, совместимые по частотному диапазону с направленными антеннами, имеющими мощность от 10 до 40 Вт в зависимости от глубины подавления группировки СРС.

Весь рабочий диапазон подавления СРС должен быть разбит на поддиапазоны с шириной полосы не более 10 МГц. Количество станций РЭП на каждом поддиапазоне – не менее трех. Например, для УКВ диапазона от 30 до 108 МГц количество станций РЭП составляет 24. Передатчики станций РЭП должны работать в непрерывном режиме. Частоты передатчиков помех должны выбираться с целью появления максимального количества интермодуляционных составляющих, т. е. вблизи центральных частот поддиапазонов.

При использовании в передатчиках РЭП и подавляемых СРС ненаправленных антенн, необходимо выполнение следующих условий:

- мощность передатчика РЭП должна быть не меньше мощности передатчика полезного сигнала;
- расстояние от подавляемой радиостанции до передатчика РЭП должно быть меньше либо равно расстоянию от передатчика полезной информации.

Графики расчета зависимости пороговой мощности сигнала P_R на входе приемника радиостанции от расстояния D до передатчика полезного сигнала (передатчика помех) с мощностью от 5 до 25 Вт представлены на рис. 12.

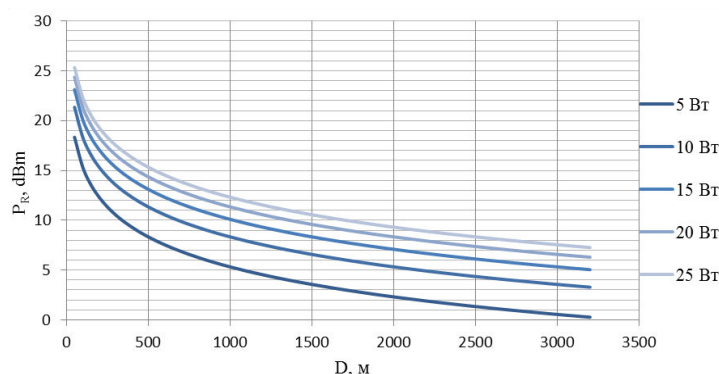


Рис. 12. Графики зависимости пороговой мощности сигнала на входе приемника от расстояния

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет эффективно осуществлять подавление СРС с ППРЧ без определения количества тактических радиостанций, используемых противником, и законов изменения их рабочих частот. В качестве станций РЭП возможно использование радиостанций, совместимых по частотному диапазону с подавляемыми СРС.

Список литературы

1. Джуринский К.Б. Интермодуляция в радиочастотных соединителях для мобильной и сотовой связи // Компоненты и технологии. 2010. № 6. С. 26–30.
2. Будяк В.С., Сидоров Д.В., Клименко Т.Б. Электромагнитная обстановка автоматизированных модульных узлов радиосвязи // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 201–205.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: РадиоСофт, 2008. 512 с.
4. Диксон Р.К. Широкополосные системы. М.: Связь, 1979. 304 с.

References

1. Dzhurinskij K.B. Intermoduljacija v radiochastotnyh soediniteljah dlja mobil'noj i sotovoj svjazi // Komponenty i tehnologii. 2010. № 6. S. 26–30. (in Russ.)
2. Budjak V.S., Sidorov D.V., Klimenko T.B. Jelektromagnitnaja obstanovka avtomatizirovannyh modul'nyh uzlov radiosvjazi // Omskij nauchnyj vestnik. 2014. № 1 (127). S. 201–205. (in Russ.)
3. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty. M.: RadioSoft, 2008. 512 s. (in Russ.)
4. Dikson R.K. Shirokopolosnye sistemy. M.: Svjaz', 1979. 304 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Матюшков А.Л., к.т.н., доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Сенюк В.О., магистрант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ступин К.В., магистрант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Matyushkov A.L., PhD, associate professor of department of information radiotechnologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Senyuk V.O., master student of information radiotechnologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Stupin K.V., master student of information radiotechnologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-25-528-56-03;
e-mail: stupin@bsuir.by
Ступин Константин Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-25-528-56-03;
e-mail: stupin@bsuir.by
Stupin Konstantsin Vladimirovich