

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.314.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХ ЛЧМ СИГНАЛОВ В НЕЛИНЕЙНОМ РАДИОЛОКАТОРЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЧАСТОТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО РАДИОЛОКАТОРА.

Бабанов Николай Юрьевич

доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева»¹.

E-mail: babanov@nntu.ru.

Дмитриев Вадим Владимирович

главный конструктор по направлению АО «ФНПЦ «ННИИРТ»².

E-mail: dmit.v@mail.ru.

Замятина Ирина Николаевна

ведущий инженер группы главного конструктора по направлению АО «ФНПЦ «ННИИРТ»².

E-mail: zamirnik@gmail.com.

¹Адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

²Адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, д. 5.

Аннотация: Статья посвящена экспериментальным оценкам характеристик обнаружения двухчастотного нелинейного радиолокатора (НРЛ), которые были получены путём математического моделирования. В ходе проведения эксперимента была собрана установка, состоящая из передающей и приёмной систем, имитирующая работу двухчастотного НРЛ с применением ЛЧМ зондирующих сигналов, анализировались характеристики вторичного излучения объекта типа биконический нелинейный рассеиватель; к отражённому сигналу от объекта поиска применялась корреляционная обработка на основе согласованного фильтра сжатия. Проведённые эксперименты подтвердили, что использование, в качестве зондирующего сигнала, суммы двух ЛЧМ сигналов на разных несущих частотах с одинаковой полосой, и организация обработки отражённого сигнала в полосе частот, включающей несколько спектральных составляющих (на суммарной комбинационной составляющей и вторых гармониках) – комбинированной составляющей, позволяет улучшить характеристики обнаружения НРЛ, а именно получить: главный лепесток сжатого сигнала с одним явно выраженным максимумом, наименьшей шириной, наибольшее отношение боковые/лепестки, что подтверждает теоретические выводы, сделанные в ранних статьях.

Ключевые слова: нелинейная радиолокация, гармоники и комбинационные составляющие, комбинированная составляющая, биконический нелинейный рассеиватель, обработка сигнала, согласованный фильтр.

Под НРЛ в настоящей статье будем понимать приёмно-передающую систему, позволяющую обнаруживать объекты поиска, содержащие нелинейные элементы (ОНЭ), на продуктах преобразования зондирующего сигнала (ЗС) его нелинейным элементом (НЭ) (гармониках и комбинационных составляющих), которые содержатся в спектре отражённого сигнала

(ОС) от данного объекта поиска [1].

Известно [2, 3], что использование в НРЛ сложного ЗС в виде ЛЧМ сигнала, а в приёмнике, согласованного с ОС от объекта поиска, фильтра, позволяет не только повысить качество измерения координат (в частности, дальности) до объекта поиска, но и получить разрешение нескольких ОНЭ. В частности, двух-

частотный способ зондирования, когда в качестве ЗС используется два ЛЧМ сигнала на разных несущих частотах f_1 и f_2 с одинаковой полосой Δf , одновременно излучённые в пространство, с обработкой ОС на основе согласованного фильтра (СФ), позволяют получить на его выходе сжатый сигнал с наилучшими характеристиками [4]. Также переход в НРЛ к двухчастотному способу зондирования снимает проблемы кратности частот ЗС и ОС, которые возникают при использовании широкополосных ЗС [5].

В статье [4] показан механизм формирования в ОС от ОНЭ спектральных составляющих при воздействии на него ЛЧМ сигнала с полосой Δf на несущей частоте f_1 и простого радиоимпульса на несущей частоте f_2 , а так же двух ЛЧМ сигналов на несущих частотах f_1 и f_2 с одинаковой полосой Δf . Учёт специфики нелинейного преобразования ЗС на ОНЭ, а именно то, что в спектре многочастотного ОС содержится несколько нелинейных продуктов (гармоник и комбинационных составляющих), для которых наблюдается взаимный синхронизм, позволит улучшить параметры НРЛ. Для этого обработку ОС от ОНЭ следует вести в полосе частот, включающей несколько спектральных составляющих ОС: суммарную комбинационную составляющую и вторые гармоники – комбинационной составляющей (КС), а не на комбинационных составляющих или гармониках по отдельности [4, 6]. Это позволит увеличить полосу обрабатываемого сигнала, а правильный выбор соотношения несущая частота – полоса сигнала – непрерывную АЧХ. В частности, в [4] показано, для получения узкого, не искажённого главного максимума сжатого ОС на выходе СФ с наибольшим отношением сигнал/боковик (С/Б), у АЧХ на участке КС суммарная комбинационная составляющая (СКС) и вторая гармоника должны перекрываться по уровню -3 дБ относительно

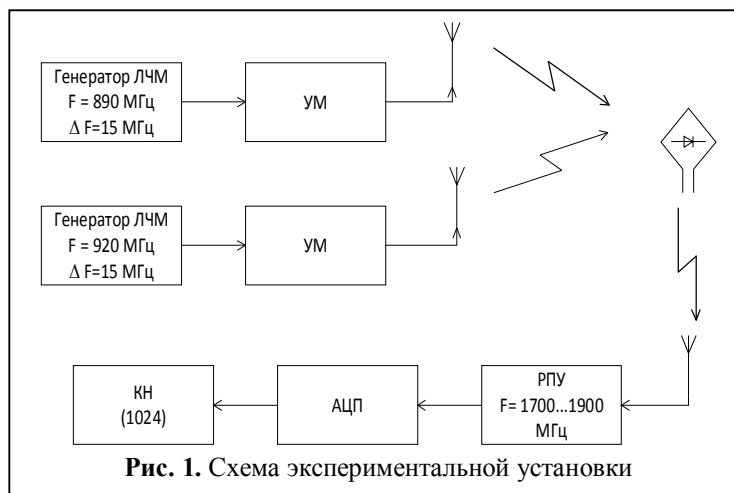


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

максимального значения более слабой составляющей.

Данная статья посвящена экспериментальным оценкам характеристик обнаружения двухчастотного НРЛ, которые были получены в статье [4] путём математического моделирования. В ходе эксперимента была собрана экспериментальная установка, состоящая из передающей и приёмной систем. ОС от ОНЭ обрабатывался в среде Mathcad.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В состав передающей системы входят: два векторных генератора ЛЧМ сигналов, формирующие сигналы на несущих частотах f_1 и f_2 с полосой Δf ; два усилителя СВЧ сигнала ШУМ-3 – усилителя мощности (УМ), в состав которых входят ФНЧ, подавляющие вторую гармонику сигнала более чем на 110 дБ, с мощностью сигнала на выходе 46,5 дБм (45 Вт); две линейки передающей антенной системы (АС).

В состав приёмной системы, имеющей сквозную чувствительность 140 дБм, входят: приёмная АС; приёмное устройство (РПУ), работающее в диапазоне частот от 1700 МГц до 1900 МГц; АЦП – 16 разрядов, частота дискретизации 1300 МГц; когерентный накопитель (КН) – количество периодов накопления 1024.

Передающая АС, используемая в эксперименте, представляет собой фазированную строку с 4-мя излучателями и имеет коэффициент усиления порядка 12,5 дБ. Приёмная АС представляет собой фазированную антенную решетку с количеством элементов 3x8 и имеет коэффициент усиления порядка 21 дБ. Внешний вид передающей и приёмной АС показан на рис. 2, 3, соответственно.

Характеристики диаграммы направленности (ДН) передающей и приёмной АС в горизонтальной и вертикальной плоскостях для нескольких частотных рабочих точек показаны на рис. 4, 5, соответственно.

Приёмо-передающая АС располагалась на штативе на высоте около 3 метров от уровня земли. Сверху на штативе располагается приёмная АС, снизу – передающая АС. Для излучения зондирующих ЛЧМ сигналов

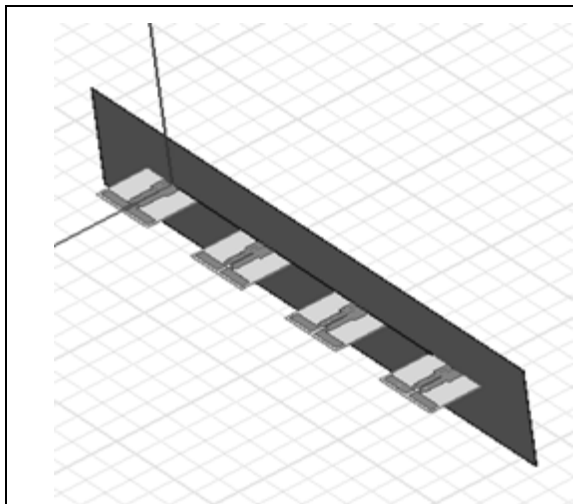


Рис. 2. Внешний вид передающей АС

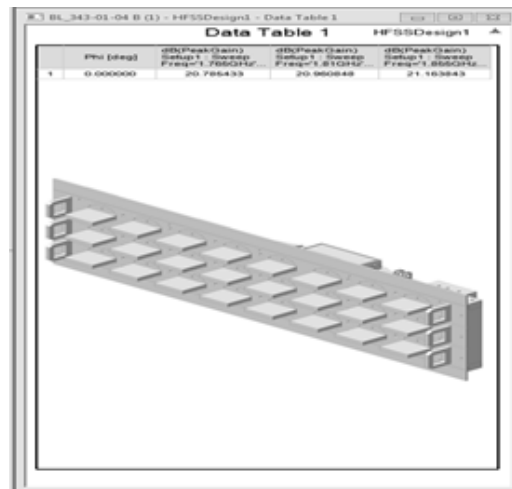


Рис. 3. Внешний вид приёмной АС

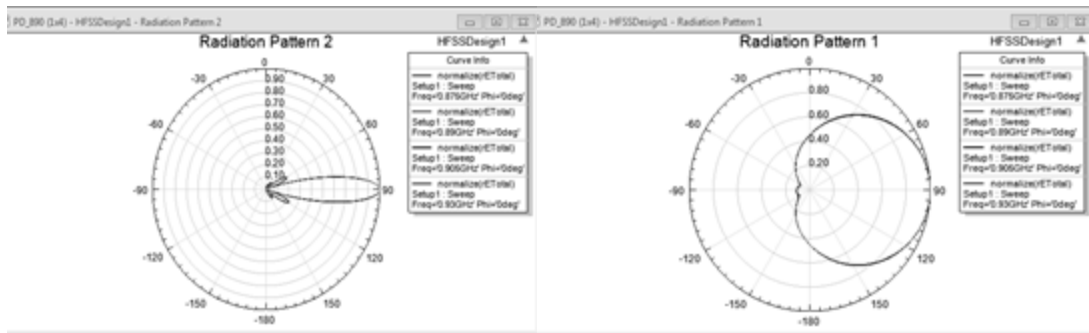


Рис. 4. ДН передающей АС в полярной системе координат в горизонтальной и вертикальной плоскостях

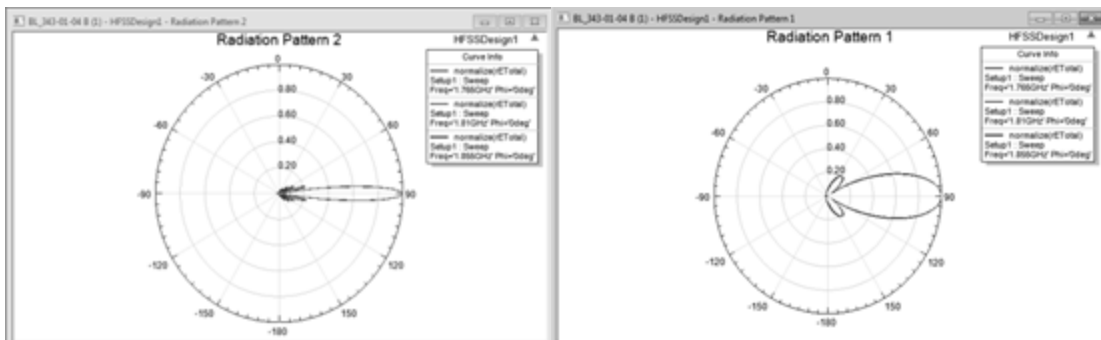


Рис. 5. ДН приёмной АС в полярной системе координат в горизонтальной и вертикальной плоскостях

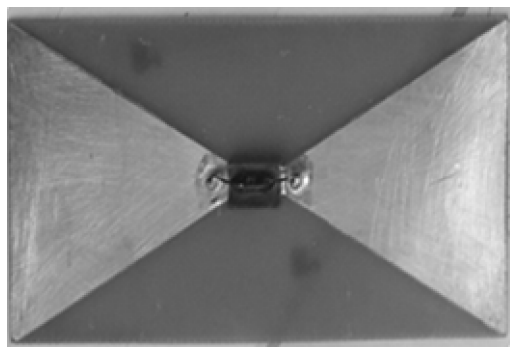


Рис. 6. Внешний вид БНР



Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки

использовались 1-я и 3-я строка передающей АС.

В качестве объекта поиска использовался биконический нелинейный рассеиватель (БНР), выполненный на двустороннем фольгированном текстолите толщиной 2 мм, размером 116x58 мм. Антенный элемент выполнен в виде металлизации поверхности текстолита, имеющей треугольную форму для увеличения диапазона рабочих частот. Элементом нелинейного преобразования рассеивателя является диод D311A. На рис. 6 показан внешний вид БНР.

На рис. 7 показан внешний вид экспериментальной установки, расстояние между АС и объектом поиска составляет 15 метров.

Проведение эксперимента

В ходе эксперимента применялся двухчастотный способ зондирования пространства периодическими ЛЧМ сигналами на разных несущих частотах f_1 и f_2 с одинаковой полосой Δf и длительностью τ , при котором два ЗС излучались одновременно. В качестве ЗС использовались сигналы со следующими параметрами:

1. ЛЧМ сигналы на несущих частотах $f_1 = 890$ МГц и $f_2 = 920$ МГц с полосой $\Delta f = 15$ МГц и длительностью $\tau = 3, 10, 15$ мкс, АЧХ показана на рис. 8, вариант 1;

2. ЛЧМ сигналы на несущих частотах $f_1 = 890$ МГц и $f_2 = 920$ МГц с полосой

$\Delta f = 5$ МГц и длительностью $\tau = 3, 10, 15$ мкс, АЧХ показана на рис. 10, вариант 2;

3. ЛЧМ сигналы на несущих частотах $f_1 = 870$ МГц и $f_2 = 920$ МГц с полосой $\Delta f = 15$ МГц и длительностью $\tau = 3, 10, 15$ мкс, АЧХ показана на рис. 12, вариант 3;

4. ЛЧМ сигнал на несущей частоте $f_1 = 890$ МГц с полосой $\Delta f = 15$ МГц и радиоимпульс на несущей частоте $f_2 = 920$ МГц и длительностями $\tau = 3, 15$ мкс, АЧХ показана на рис. 14, вариант 4;

ОС от ОНЭ, в случае квадратичного характера их ВАХ, при двухчастотном способе зондирования имеет спектральные составляющие второго порядка: гармоники ($2f_1$ и $2f_2$) и комбинационные составляющие ($f_1 + f_2$, $f_2 - f_1$), причём уровень комбинационных составляющих значительно превышает уровень высших гармоник [2, 4]. Использованный в эксперименте в качестве объекта поиска БНР, в силу преимущественно квадратичного характера его ВАХ [7, 8], будет иметь отклик на спектральных составляющих второго порядка.

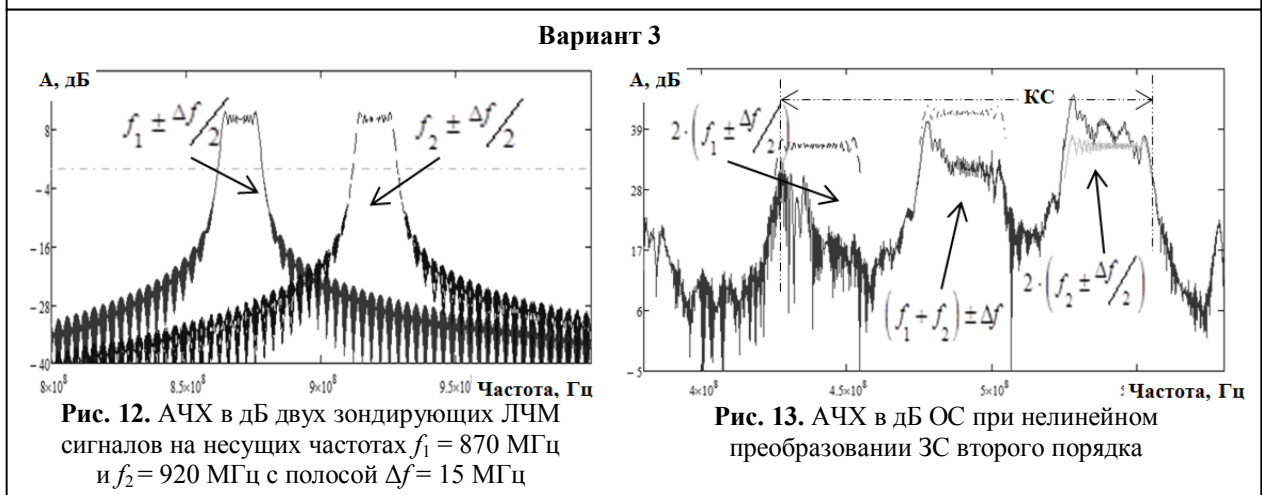
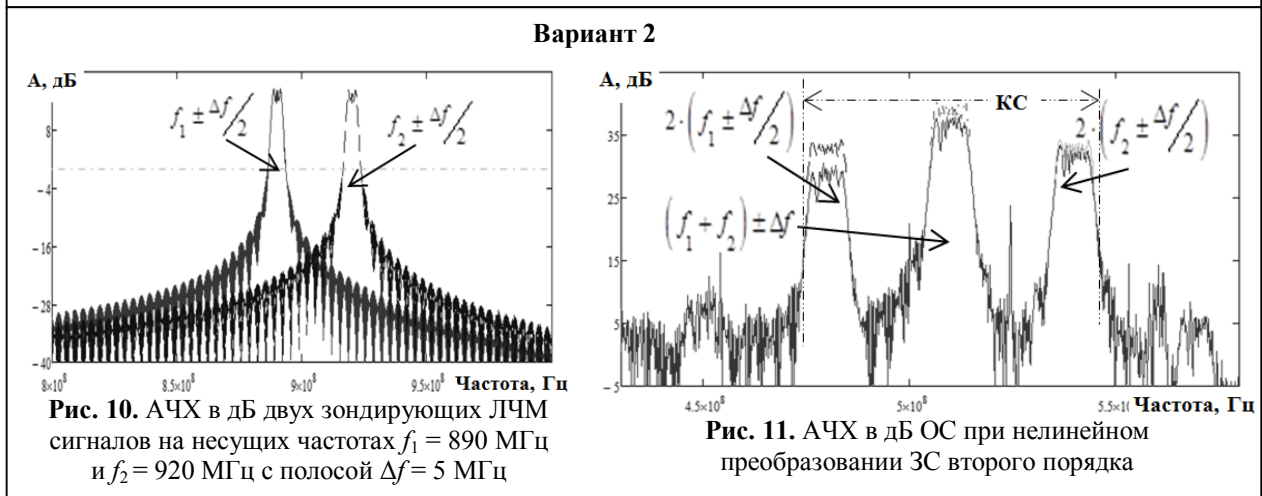
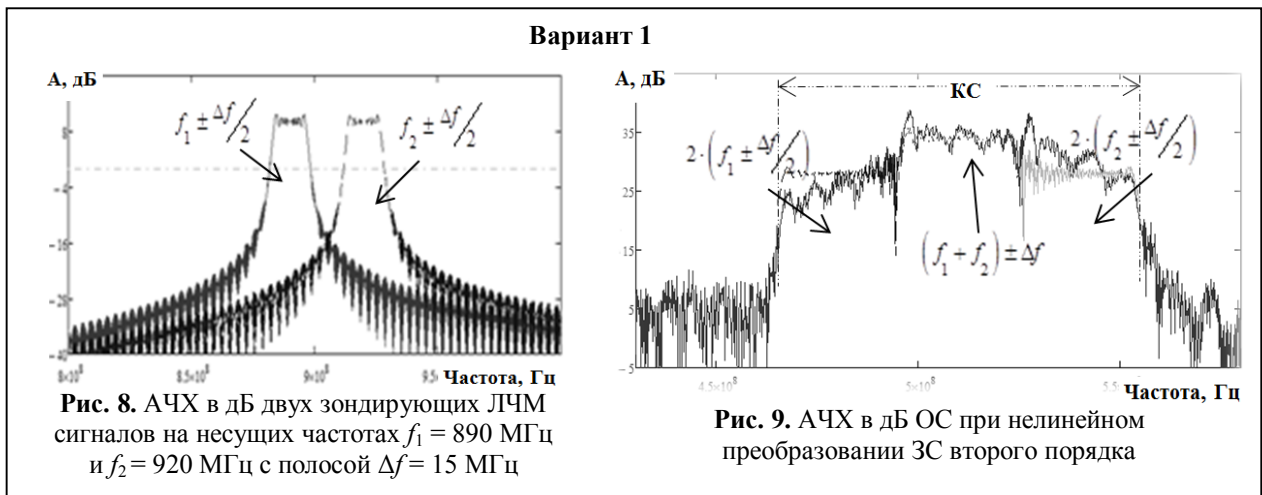
Обработка ОС на каждой спектральной составляющей осуществлялась корреляционным методом, на основе СФ [9]. Характеристика СФ формировалась с учётом квадратичного преобразования ЗС, т.е. на вторых гармониках или на частоте СКС с учётом их полосы.

АЧХ ОС от БНР, полученные в ходе эксперимента для вариантов ЗС 1–4, показаны на рис. 9, 11, 13, 15, соответственно.

Приведённые АЧХ ОС подтверждают наличие нелинейного преобразование второго порядка в БНР [7, 8].

При двухчастотном способе зондирования

пространства ЛЧМ сигналами на разных несущих частотах с одинаковой полосой Δf (варианты 1–3), в ОС, рассеянном от ОНЭ на спектральных составляющих второго порядка, вторых гармониках ($2f_1 \pm \Delta f$ и $2f_2 \pm \Delta f$) и СКС ($f_1 + f_2 \pm \Delta f$), сохраняется фазовая струк-



Вариант 4

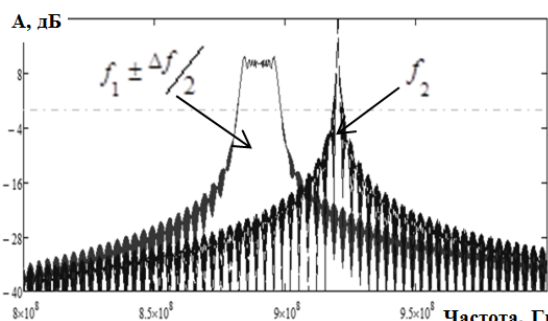


Рис. 14. АЧХ в дБ двух зондирующих сигналов: ЛЧМ сигнала на несущей частоте $f_1 = 890$ МГц с полосой $\Delta f = 15$ и радиоимпульса на несущей частоте $f_2 = 920$ МГц

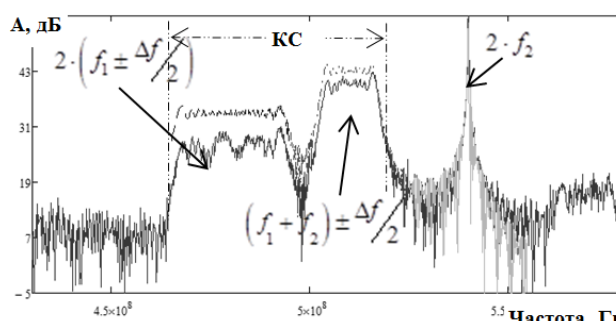


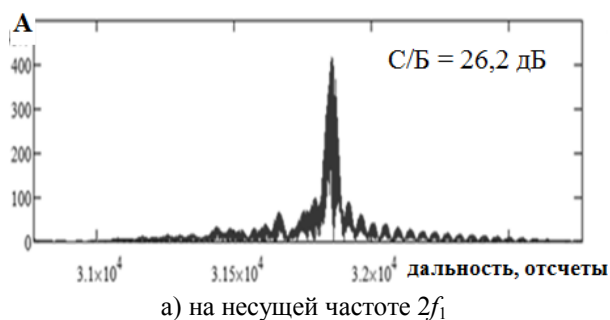
Рис. 15. АЧХ в дБ ОС при нелинейном преобразовании ЗС второго порядка

тура ЛЧМ сигнала с увеличением полосы в два раза ($2\Delta f$), рис. 9, 11, 13. В случае зондирования пространства ЛЧМ сигналом с полосой Δf и радиоимпульсом на разных несущих частотах (вариант 4), в ОС, рассеянном от ОНЭ на спектральных составляющих второго порядка, второй гармонике ($2f_1 \pm \Delta f$) и СКС ($(f_1 + f_2) \pm \Delta f/2$), сохраняется фазовая структура ЛЧМ сигнала, причём, с увеличением полосы в два раза ($2\Delta f$) только на второй гармонике, на СКС полоса остается неизменной

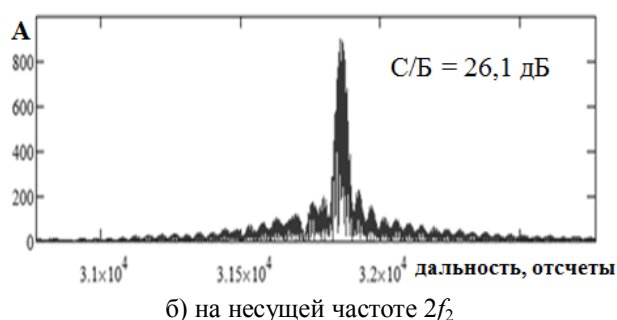
(Δf), рис. 15. Полученные в процессе эксперимента АЧХ, подтверждают теоретические результаты, приведенные в статьях [2, 4].

Результаты обработки ОС на каждой спектральной составляющей (вторых гармониках и частоте СКС) для длительности ЗС $\tau = 15$ мкс для вариантов ЗС 1–4 в программной среде Mathcad показаны на рисунках: рис. 16 а, б, в – вариант 1, рис. 17 а, б, в – вариант 2, рис. 18 а, б, в – вариант 3, рис. 19 а, б – вариант 4.

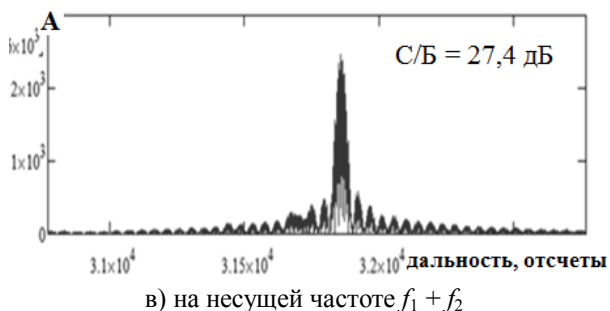
Вариант 1



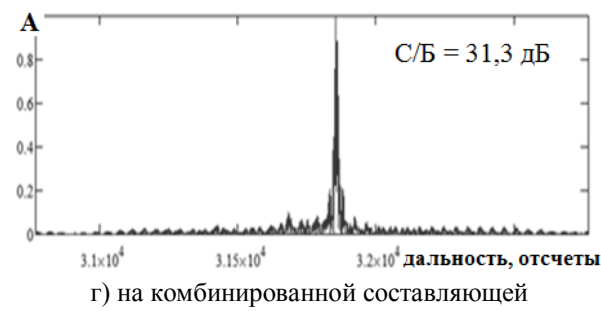
а) на несущей частоте $2f_1$



б) на несущей частоте $2f_2$

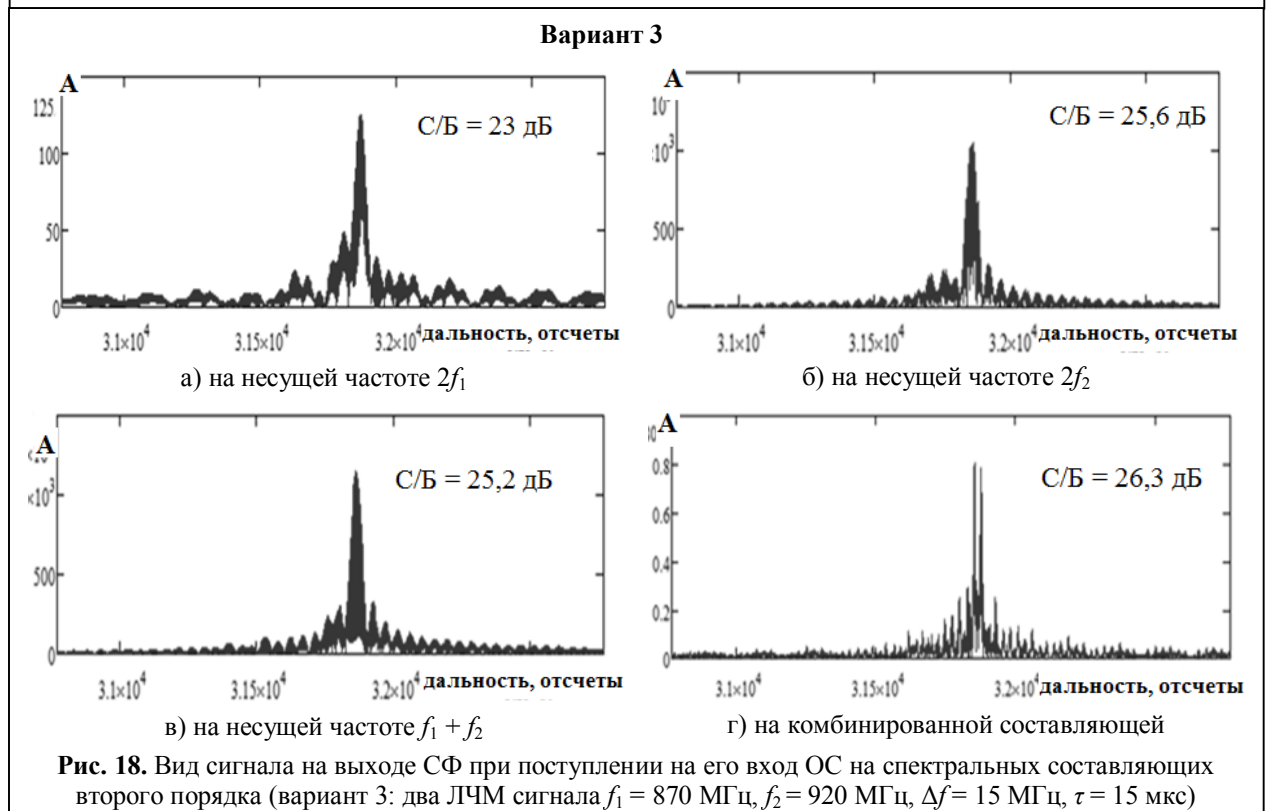
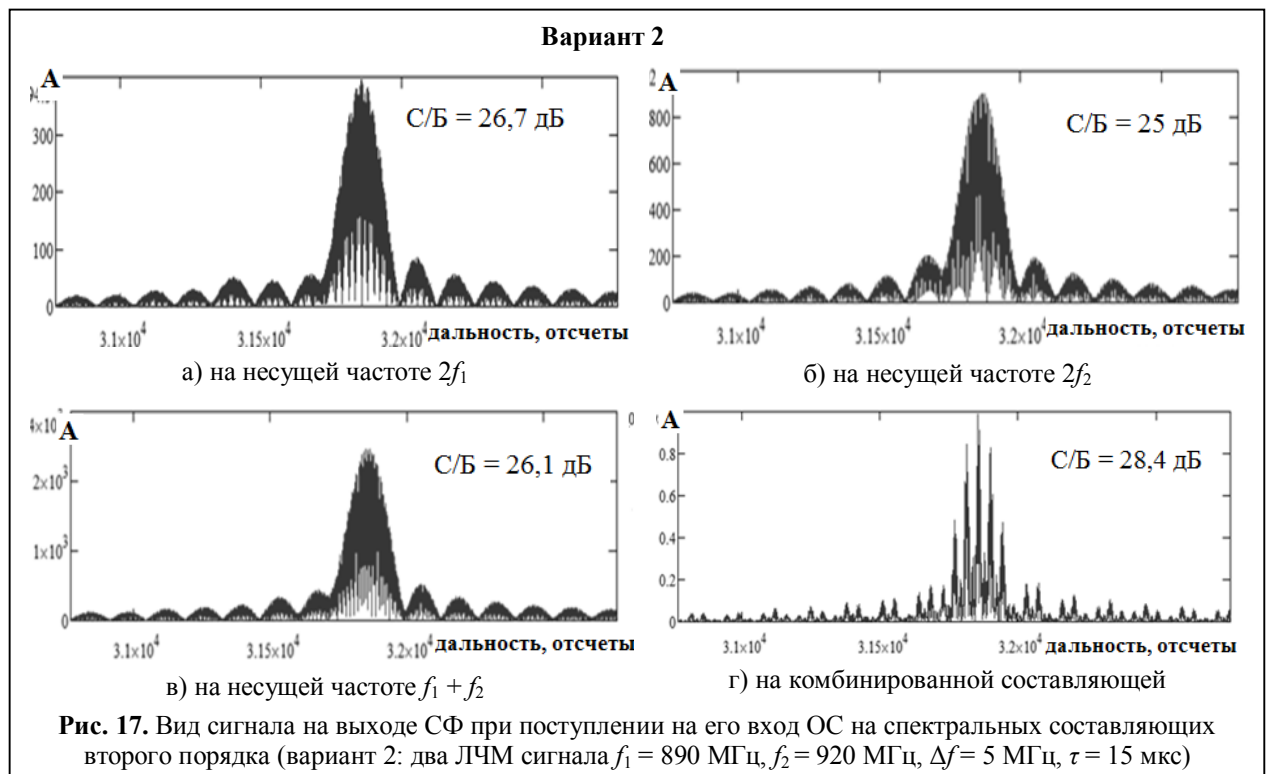


в) на несущей частоте $f_1 + f_2$



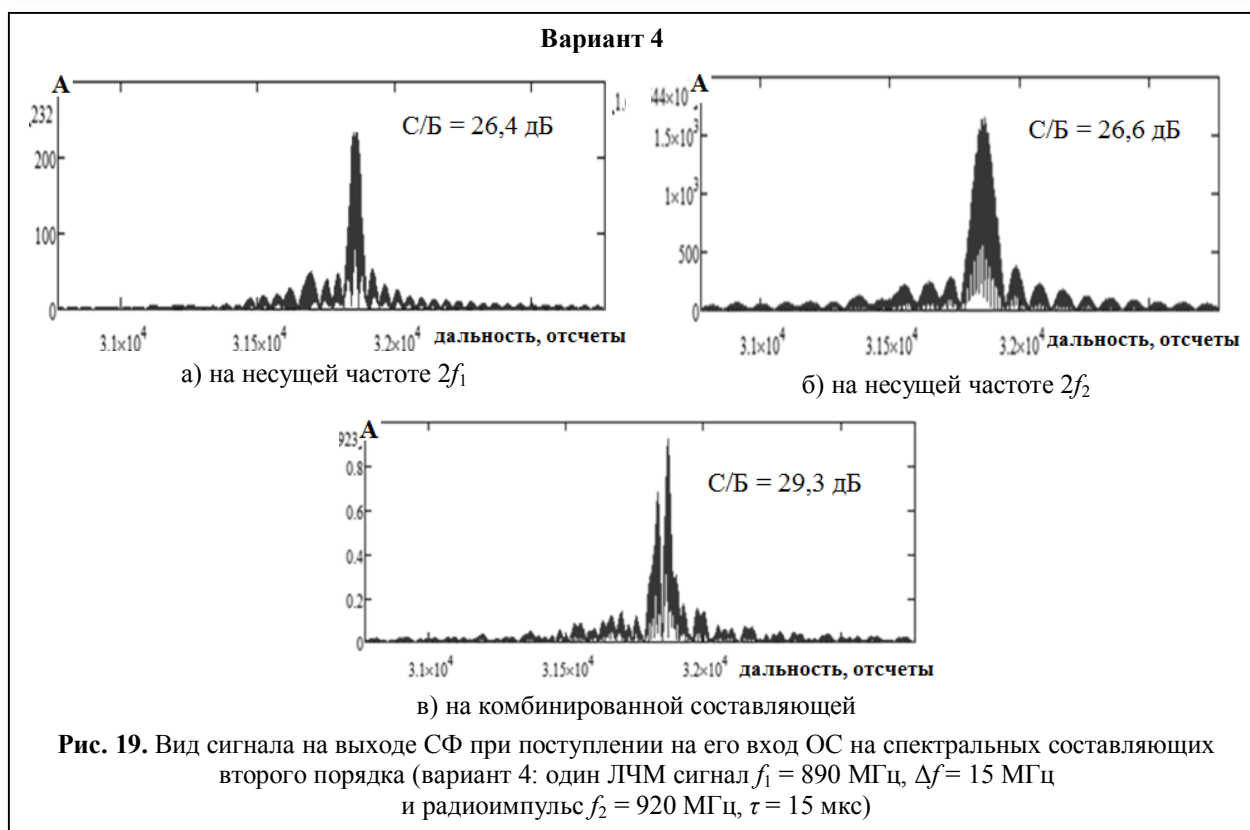
г) на комбинированной составляющей

Рис. 16. Вид сигнала на выходе СФ при поступлении на его вход ОС на спектральных составляющих второго порядка (вариант 1: два ЛЧМ сигнала $f_1 = 890$ МГц, $f_2 = 920$ МГц, $\Delta f = 15$ МГц, $\tau = 15$ мкс)



Обработка ОС осуществлялась и в полосе частот, включающей несколько спектральных составляющих, на КС. Для вариантов 1–3 ОС представляет собой сумму ЛЧМ сигналов на

трех несущих частотах, на двух вторых гармониках и частоте СКС, с полосой, занимающей частотный интервал $\{2f_1 - \Delta f \div 2 \cdot f_2 + \Delta f\}$; для варианта 4 ОС



представляет собой сумму ЛЧМ сигналов на двух несущих частотах, на второй гармонике и частоте СКС, с полосой занимающей частотный интервал $\{2f_1 - \Delta f \div f_1 + f_2 + \Delta f/2\}$. Для обработки ОС на КС достаточно сложить результаты обработки ОС на основе СФ на каждой спектральной составляющей, из которых она состоит. Результаты обработки ОС на КС при длительности ЗС $\tau = 15$ мкс для вариантов ЗС 1–4 показаны на рисунках: рис. 16 г – вариант 1, рис. 17 г – вариант 2, рис. 18 г – вариант 3, рис. 19 в – вариант 4.

Характеристики сжатого сигнала на выходе СФ, полученные при обработке ОС на разных спектральных составляющих от объекта поиска типа БНР, для вариантов ЗС 1–4 приведены ниже.

Уровень С/Б определялся как среднеквадратическое значение корреляционной функции огибающей ОС (вида сигнала на выходе СФ) вне его главного лепестка [10].

На рис. 20 показаны зависимости отношения С/Б в дБ на выходе СФ при поступлении

на его вход ОС на спектральных составляющих второго порядка от длительности зондирующего сигнала для вариантов 1–4.

Разный вид сжатого сигнала на выходе СФ при поступлении на его вход ОС на КС, согласно приведённым результатам обработки, является следствием различной формы АЧХ КС в пределах её полосы, рис. 9, 11, 13, 15 (варианты 1–4). Из теории фильтрации следует [9], что для уменьшения площади сечения сигнала на выходе СФ по оси времени, исследуемый процесс должен обладать широким и равномерным энергетическим спектром. При приближении АЧХ исследуемого процесса к прямоугольной форме (непрерывная АЧХ), форма сжатого сигнала приближается к виду $|\sin(x)/x|$. АЧХ зондирующих ЛЧМ сигналов имеет не идеальную прямоугольную форму (рис. 8, 10, 12, 14): за пределами полосы пропускания АЧХ спадает, причём спады её плавные, но резкие и довольно протяжённые; в пределах полосы пропускания АЧХ имеет колебательный

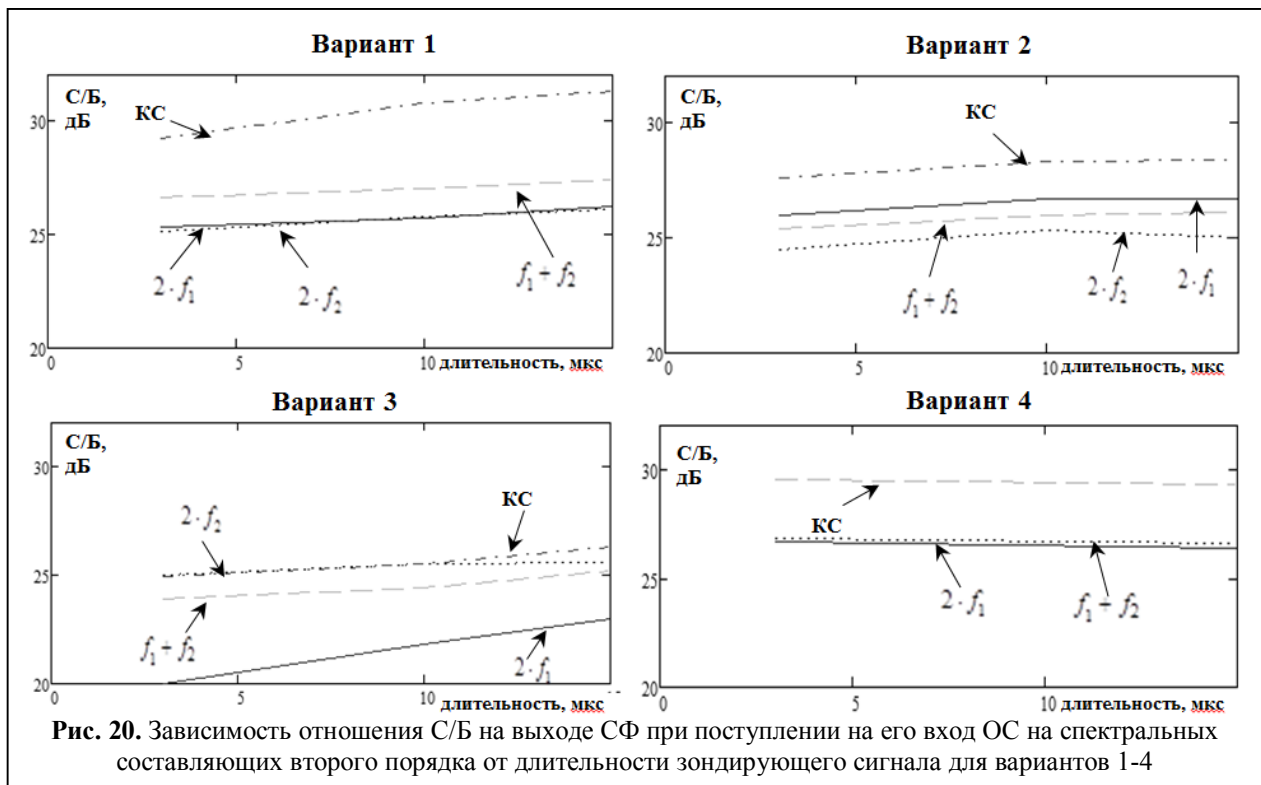


Рис. 20. Зависимость отношения С/Б на выходе СФ при поступлении на его вход ОС на спектральных составляющих второго порядка от длительности зондирующего сигнала для вариантов 1-4

характер. Разные соотношения между параметрами ЗС, несущими частотами и полосой сигнала (варианты 1–4) при квадратичном преобразовании, согласно ВАХ ОНЭ, сказываются на расстановке несущих частот спектральных составляющих второго порядка, т.е. на форме АЧХ ОС в пределах полосы КС и, как следствие, на форме сжатого сигнала.

В ходе эксперимента, при использовании в качестве ЗС двух ЛЧМ сигналов на разных несущих частотах, были выбраны следующие соотношения несущих частот:

– $f_2 = f_1 + 6 \cdot \Delta f$ (вариант 2), АЧХ КС прерывистая (имеет провалы), рис. 11, АЧХ вторых гармоник и СКС не перекрываются в области полосы пропускания (область их расстановки порядка четыре полосы ЗС), главный лепесток сжатого сигнала изрезанный, имеет пять явно выраженных максимумов (рис. 17, г);

– $f_2 = f_1 + 3,333 \cdot \Delta f$ (вариант 3), АЧХ КС прерывистая (имеет провалы), рис. 13, АЧХ вторых гармоник и СКС не перекрываются в области полосы пропускания (область их рас-

становки порядка полосы ЗС), главный лепесток сжатого сигнала изрезанный, имеет два явно выраженных максимума (рис. 18, г);

– $f_2 = f_1 + 2 \cdot \Delta f$ (вариант 1), АЧХ КС непрерывная рис. 9, АЧХ вторых гармоник и СКС перекрываются полосой пропускания и спадами, главный лепесток сжатого сигнала имеет один явно выраженный максимум (рис. 16, г).

При использовании в качестве ЗС ЛЧМ сигнала и радиоимпульса на разных несущих частотах было выбрано соотношение несущих частот $f_2 = f_1 + 2 \cdot \Delta f$ (вариант 4), АЧХ КС прерывистая (имеет провалы) рис. 15, АЧХ второй гармоник и СКС не перекрываются в области полосы пропускания (область их расстановки порядка 0,5 полосы ЗС), главный лепесток сжатого сигнала изрезанный, имеет два явно выраженных максимума (рис. 19, в).

Приведённые зависимости отношения С/Б от длительности ЗС (рис. 20) подтверждают, что обработка ОС на КС позволяет получить наибольшее отношение С/Б по сравнению с обработкой ОС на спектральных составляющих по отдельности, причём чем больше дли-

тельность ЗС, тем больше это отношение.

На основании результатов, полученных в ходе проведения эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1. Двухчастотный способ зондирования периодическими ЛЧМ сигналами на разных несущих частотах с одинаковой полосой и одинаковой длительностью, при котором два ЗС одновременно излучались в пространство, для соотношения несущих частот $f_2 = f_1 + 2 \cdot \Delta f$ ($f_1 = 890$ МГц, $f_2 = 920$ МГц, $\Delta f = 15$ МГц) (вариант 1), при организации обработки ОС на КС позволяет:

– получить главный лепесток сжатого сигнала на выходе обработки с одним явно выраженным максимумом, причём его ширина по уровню 0,5 в три раза меньше, что улучшает разрешающую способность и точность измерения дальности;

– увеличить С/Б на выходе обработки при длительностях ЗС:

$\tau = 10 \div 15$ мкс – на 5 дБ (по сравнению с обработкой на вторых гармониках), на 4 дБ (по сравнению с обработкой на СКС),

$\tau = 3$ мкс – на 4 дБ (по сравнению с обработкой на вторых гармониках), на 3 дБ (по сравнению с обработкой на СКС).

2. Сравнивая варианты 2, 3, 4 по характеристикам сжатого сигнала на выходе обработки ОС на КС при двухчастотном способе зондирования периодическими ЛЧМ сигналами на разных несущих частотах с одинаковой полосой и одинаковой длительностью с вариантом 1:

вариант 2 – главный лепесток шириной по уровню 0,5 в три раза больше, имеет изрезанный характер из-за наличия провалов (двух) в полосе КС и неидентичности передающих трактов ЛЧМ сигналов, что приведёт к ошибке измерения дальности и невозможности разрешения двух объектов поиска; отношение С/Б для всех длительностей ЗС на 1,5 ÷ 2 дБ меньше,

вариант 3 – главный лепесток имеет такую же ширину по уровню 0,5 и два явно выраженных

максимума, из-за наличия провала в полосе КС и неидентичности передающих трактов ЛЧМ сигнала, что приведёт к ошибке при измерении дальности и невозможности разрешения двух объектов поиска; отношение С/Б для всех длительностей ЗС на 5 ÷ 6 дБ меньше,

вариант 4 – главный лепесток шириной по уровню 0,5 в два раза больше, имеет два явно выраженных максимума, из-за наличия провала в полосе КС и неидентичности передающих трактов ЛЧМ сигнала, что приведёт к ошибке при измерении дальности и невозможности разрешения двух объектов поиска; отношение С/Б при $\tau = 15$ мкс меньше на 2 дБ, при $\tau = 3$ мкс – такое же.

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что двухчастотный способ синхронного зондирования периодическими ЛЧМ сигналами на разных несущих частотах с одинаковой полосой и длительностью при соотношении несущих частот ЗС $f_2 = f_1 + 2 \cdot \Delta f$ (вариант 1) является наиболее эффективным, позволяющим при организации обработки ОС от объекта поиска на КС получить наилучшие характеристики сжатого сигнала на его выходе, а именно: главный лепесток сжатого сигнала с одним явно выраженным максимумом наименьшей ширины, наибольшее отношение С/Б, что подтверждает теоретические выводы, сделанные в статье [4]. Причём, увеличение длительности ЗС (порядка $\tau = 10 \div 15$ мкс), приводит к увеличению отношения С/Б, в частности, по сравнению с обработкой на вторых гармониках на 5 дБ, по сравнению с обработкой на СКС на 4 дБ. Расстановка несущих частот по варианту 1 и обработка на КС даёт выигрыш в отношении С/Б на 2–5 дБ по отношению к другим рассмотренным вариантам.

Литература

1. Hager R.O. Harmonic radar systems for near ground in foliage nonlinear scatterers // IEEE Trans. on Aerospace and Electron Systems. 1976. Vol. 12. No. 2. P. 230.

2. Дмитриев В.В., Замятина И.Н. Применение сложных сигналов в двухчастотном НРЛ / Радио-

технологии противодействия террористическим угрозам. М.: Радиотехника, 2016. 168 с.

3. Пат. РФ № 2621319. Способ и устройство измерения дальности в двухчастотном нелинейном радиолокаторе. Дмитриев В.В., Замятина И.Н. Заявл. 26.04.2016; опубл. 02.06.2017. Бюл. № 16. 15 с.

4. *Бабанов Н.Ю., Дмитриев В.В., Замятина И.Н.* О применении ЛЧМ-сигналов в нелинейной радиолокации // Вестник НГИЭИ. 2018. № 3 (82). С. 18–27.

5. *Ларцов С.В.* О нелинейном рассеянии при использовании многочастотного и одночастотного зондирующих сигналов // Радиотехника и электроника. 2001. Т.46. № 7. С. 833.

6. Пат. РФ № 2643199. Способ улучшения характеристик нелинейного радиолокатора. Дмитриев

В.В., Замятина И.Н. Заявл. 10.10.2016; опубл. 31.01.2018. Бюл. № 4. 14 с.

7. *Щербаков Г.Н., Николаев А.В.* Исследование нелинейных свойств биконического отражателя – физической модели боеприпаса с электронными устройствами // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 33–39.

8. *Горбачев А.А., Ларцов С.В., Тараканков С.П., Чигин Е.П.* Амплитудные характеристики нелинейных рассеивателей // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 5. С. 558.

9. *Лезин Ю.С.* Введение в теорию и технику радиотехнических систем. М.: Сов. радио, 1986. 280 с.

10. *Ширман Я.Д.* Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.

Поступила 25 июня 2019 г.

English

THE USE OF TWO LFM SIGNALS IN A NONLINEAR RADAR. EXPERIMENTAL EVALUATION OF DOUBLE-FREQUENCY NLR PERFORMANCE.

Nikolay Yurievich Babanov – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Vice Rector for Research, NNSTU named after R.E. Alekseev¹.

E-mail: babanov@nntu.ru.

Vadim Vladimirovich Dmitriev – Chief Design Engineer by area of activity, JSC Federal Scientific and Production Centre NNIIRT².

E-mail: dmit.v@mail.ru.

Irina Nikolayevna Zamyatina – Lead Engineer of Chief Design Engineer team, JSC Federal Scientific and Production Centre NNIIRT².

E-mail: zamirnik@gmail.com.

¹*Address:* 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Minin str., 24.

²*Address:* 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Shaposhnikov str., 5.

Abstract: The article deals with experimental evaluation of detection performance of double-frequency nonlinear radar (NLR) where the following was used as probing signal: linear-frequency modulated (LFM) signal and radio pulse at different carrier frequencies and two LFM signal on different carrier frequencies with the same bandwidth and which are simultaneously emitted into space. The article describes in detail the test facility, characteristics of transmitting and receiving antennas, as well as its visual appearance. The article presents amplitude-frequency response (AFR) of reflected signal from the search object of type as biconic nonlinear scatterer for different ratios between carrier frequencies of probing signal obtained during the experiment, which confirm available nonlinear second-order transform in it. It is demonstrated that to improve NLR parameters (resolution, range accuracy measurement, etc.), processing of reflected signal from the search object with nonlinear properties should be performed in frequency bandwidth including several of its spectral components: cumulative intermodulation component and second harmonics, i.e. in combined component. Moreover, different ratios between carrier frequencies of the probing signal affect the compressed signal characteristics in output of processing. Several presented variants of ratios between the carrier frequencies of the probing signal enabled to choose the optimal ratio to obtain the best compressed signal performance, namely the main lobe with one pronounced maximum of the smallest width, the largest signal/side lobe ratio (S/S), and that confirms the theoretical conclusions made in early articles. The article is relevant for developers of radars when choosing probing signal parameters.

Keywords: nonlinear radar detection, harmonics and intermodulation components, combined component, biconic nonlinear scatterer, signal processing, matched filter.

References

1. *Hager R.O.* Harmonic radar systems for near ground in foliage nonlinear scatterers. IEEE Trans. on Aerospace and Electron Systems. 1976. V.12. No. 2. P. 230.
2. *Dmitriev V.V., Zamyatina I.N.* Using aggregate signals in double-frequency NLR: in collect.vol. Anti-Terror Wireless Technologies. Moscow: Radio Engineering, 2016. 168 p.
3. Pat. RU2621319. Method and device for measuring distance in double-frequency nonlinear radar. Dmitriev V.V., Zamyatina I.N. Appl. 26.04.2016; reg. 02.06.2017. Bul. No. 16. 15 p.
4. *Babanov N.Yu., Dmitriev V.V., Zamyatina N.I.* Using LFM signals in non-linear radars. Bulletin of NNSEEU. 2018. No. 3 (82). Pp. 18–27.
5. *Lartsov S.V.* On nonlinear scattering using multi-frequency and single-frequency probing signals. Radio Engineering and Electronics. 2001. Vol. 46. No. 7. P. 833.
6. Pat. RU2643199. Enhancement method of nonlinear radar performance. Dmitriev V.V., Zamyatina I.N. Appl. 10.10.2016; reg. 31.01.2018. Bul. No. 4. 14 p.
7. *Shcherbakov G.N., Nikolaev A.V.* Investigation of nonlinear properties of biconical reflector – physical model of ammunition with electronic devices. Special-purpose Equipment and Communication. 2011. No. 1. Pp. 33–39.
8. *Gorbachev A.A., Lartsov S.V., Tarakanov S.P., Chign E.P.* Amplitude characteristics of nonlinear scatterers. Radio Engineering and Electronics. 1996. Vol. 41. No. 5. P. 558.
9. *Lezin Yu.S.* Introduction to the theory and technology of radio engineering systems. Moscow: Sovetskoye radio, 1986. 280 p.
10. *Shirman Ya.D.* Fundamental theory of radar detection. Moscow: Sovetskoye radio, 1970. 560 p.