

Метод подавления прямого сигнала подсвета в многопозиционной пассивной РЛС, работающей по сигналам сторонних источников

Рогожников Е.В., Крюков Я.В., Шибельгут А.А., к.т.н. Ворошилин Е.П.
Томский государственный университет управления и радиоэлектроники,
Университет машиностроения

8 (382) 241-34-78, udzhon@mail.ru, yaachik@gmail.com, shibelgut@gmail.com,
8 (495) 223-05-23, voroshilin@mami.ru

Аннотация. В статье рассматриваются аналоговые методы подавления сигнала передатчика в приемном канале в пассивных радиолокационных системах, работающих по сигналам сторонних источников. Предлагается аналоговый метод компенсации сигнала передатчика в приемном тракте для многопозиционных пассивных радиолокационных систем. Представлены результаты экспериментальной проверки предлагаемого метода.

Ключевые слова: Пассивная радиолокационная система, аналоговая компенсация, экспериментальная проверка, подавление сигнала передатчика, передающий тракт, приемный тракт, блок управления компенсацией.

Введение

Пассивные радиолокационные системы (ПРЛС), работающие по сторонним источникам сигнала подсвета, активно развиваются [1]. ПРЛС, использующие сигналы сторонних источников, могут иметь однопозиционную и многопозиционную структуру. Многопозиционная конфигурация обладает рядом преимуществ перед однопозиционной [2]. К основным преимуществам относятся: повышенная надежность, возможность реконфигурации, увеличенная зона действия и др. Однако многопозиционная конфигурация ПРЛС имеет и недостатки, одним из которых является высокая стоимость системы. В однопозиционной системе для высокоточного определения пеленга используются многоэлементные антенные решетки, позволяющие добиться высокого углового разрешения. В многопозиционных пассивных радиолокационных системах высокоточное определение пеленга не требуется, поскольку пространственная локализация цели может быть произведена с использованием разностно-дальномерного метода и его модификаций [3]. В случае замены многоэлементной антенной решетки широконаправленной антенной системой, либо антенной решеткой с малым количеством элементов, стоимость МПРЛС может быть существенно снижена. Приемный пункт ПРЛС включает опорный и приемный каналы, приемный канал предназначен для приема сигнала, отраженного от радиолокационной цели, а опорный канал служит для приема прямого сигнала от источника сигнала подсвета. Одной из основных проблем, которую необходимо решать в ПРЛС, является прием слабого сигнала, отраженного от радиолокационной цели, на фоне мощного прямого сигнала источника подсвета, так как он поступает и в приемный канал по боковому лепестку диаграммы направленности. Разница между прямым сигналом передатчика и сигналом, отраженным от радиолокационной цели, может достигать 100 дБ [4]. В данной статье рассматриваются существующие подходы к решению данной проблемы, а также предложен метод подавления прямого источника сигнала подсвета в приемном канале.

Существующие методы

Существуют аналоговые и цифровые методы подавления прямого сигнала источника в приемном канале. Автоматическая регулировка усиления приемного тракта – процесс, при котором выходной сигнал некоторого устройства, как правило электронного усилителя, автоматически поддерживается постоянным по некоторому параметру (например, мощности сигнала), независимо от мощности входного сигнала [5]. Таким образом, при большом уровне входного сигнала коэффициент усиления приемного тракта снижается для исключения перегрузки выходных каскадов приёмников. Из-за этого снижается коэффициент усиления

ния полезного сигнала, отраженного от радиолокационной цели. Это приводит к снижению отношения мощности полезного сигнала к мощности шума и затрудняет дальнейшую обработку сигнала [6].

Существуют различные подходы к решению данной проблемы, каждый из которых имеет достоинства и недостатки.

1. Электродинамическое экранирование прямого сигнала. Между приемной антенной РЛС и источником сигнала подсвета устанавливается сетчатый экран. Подавление прямого сигнала достигает 40 – 50 дБ. Для размеров экрана (15x15 м) – более 30 дБ. Основные недостатки экрана – стационарность, сложность монтажа, парусность. Альтернатива – размещение приемника, в области радиотени [7].
2. Поляризационная режекция прямого сигнала. Как правило, источником сигнала подсвета излучается сигнал с линейной поляризацией. При отражении от цели происходит деполяризация и появление кроссполяризационной компоненты. Прием только кроссполяризационной составляющей позволяет достигнуть компенсации прямого сигнала порядка 10 дБ [8].
3. Формирование нуля диаграммы направленности в направлении источника сигнала подсвета. Данный метод находит широкое применение в ПРЛС и позволяет производить адаптивное подавление прямого сигнала передатчика. К примеру, в работе [9] для 8 элементной антенной решетки удалось добиться ослабления прямого сигнала в 35 дБ. В случае малого количества антенн в решетке эффективность данного подхода снижается, кроме этого происходит искажение основного лепестка диаграммы направленности [10].

Предлагаемый метод подавления прямого сигнала передатчика в приемном канале

Суть метода заключается в компенсации прямого сигнала передатчика подсвета в приемном канале при помощи опорного сигнала, поступающего в опорный канал. Обобщенная структурная схема приемного пункта ПРЛС приведена на рисунке 1.

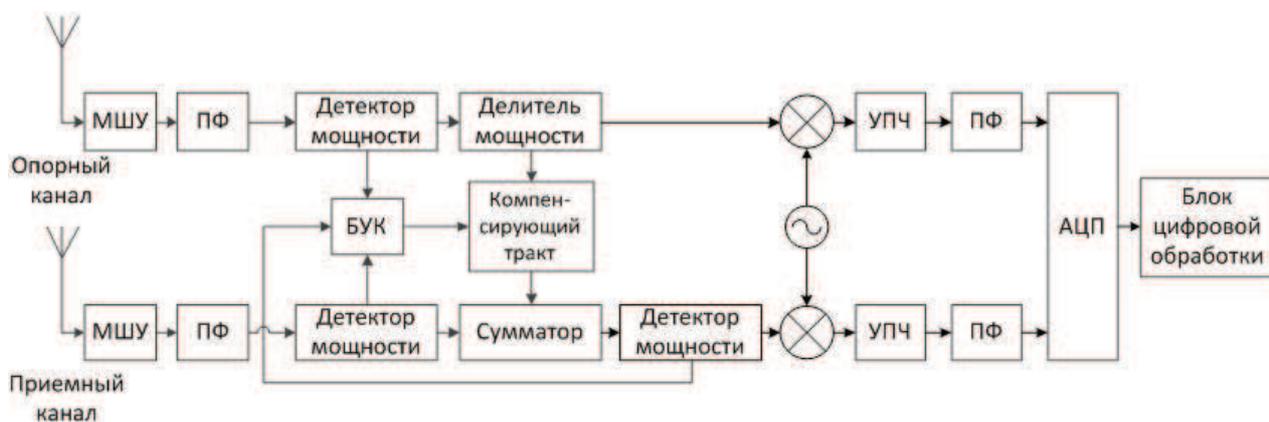


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема приемного пункта

На рисунке 1 обозначено: МШУ – малозумящий усилитель, ПФ – полосовой фильтр, БУК – блок управления компенсацией, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

Предлагаемый способ компенсации заключается в том, что сигнал передатчика, принимаемый опорным каналом, проходит через компенсирующий тракт и складывается с сигналом, поступившим в приемный канал. Параметры компенсирующего тракта настраиваются таким образом, чтобы сигналы на входе сумматора имели одинаковую задержку и ослабление но при этом были в противофазе.

Детекторы мощности необходимы для изначальной оценки мощности прямого сигнала передатчика в приемном и опорном канале, а также для контроля уровня сигнала после компенсации и подстройки элементов компенсирующего тракта. Подстройка элементов компенсирующего тракта производится блоком управления компенсацией.

Компенсирующий тракт может иметь различную структуру. На рисунке 2 приведена структурная схема компенсирующего тракта.

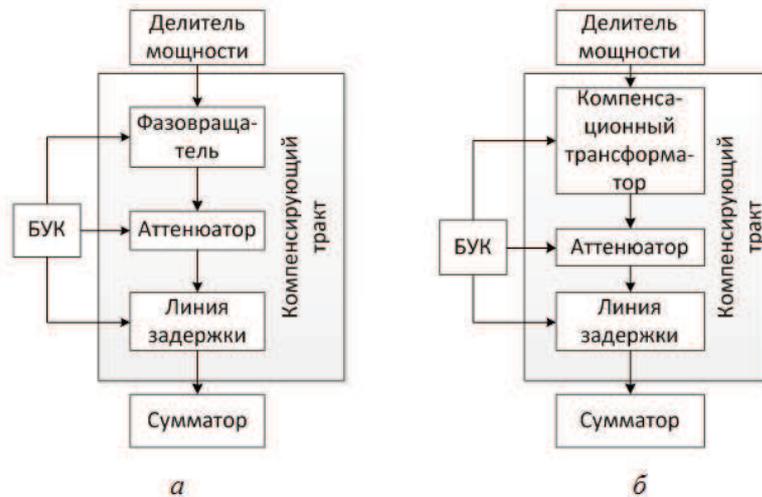


Рисунок 2. Структурная схема компенсирующего тракта: а) с использованием перестраиваемого фазовращателя, б) с использованием перестраиваемого аттенюатора

Использование перестраиваемого аттенюатора предлагается в работе [11], данное решение подходит для узкополосного сигнала радиовещания (FM Radio), но для широкополосных сигналов использование перестраиваемого фазовращателя неприемлемо, поскольку при удалении от несущей частоты уровень компенсации будет снижаться. Для устранения данного недостатка предлагается вместо фазовращателя использовать компенсационный трансформатор. Данное устройство позволяет получить инверсный сигнал без коррекитровки фазы [12].

Принимаемые в приемном пункте сигналы запишем в виде:

$$S_{\text{прям_Гл}} = A_1 \cdot (S(t)e^{j2\pi f_0 t}),$$

$$S_{\text{прям_Бок}} = A_2 \cdot (S(t)e^{j2\pi f_0 t}),$$

$$S_{\text{отр_Гл}} = A_3 \cdot (S(t + \tau)e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t + \tau)}),$$

$$S_{\text{отр_Бок}} = A_4 \cdot (S(t + \tau)e^{j2\pi(f_0 + f_d)(t + \tau)}),$$

где: $S_{\text{прям_Гл}}$ – прямой сигнал, принимаемый в опорном канале по главному лепестку диаграммы направленности, $S_{\text{прям_Бок}}$ – прямой сигнал, принимаемый в приемном канале по боковому лепестку диаграммы направленности, $S_{\text{отр_Гл}}$ – отраженный сигнал, принимаемый в приемном канале по главному лепестку диаграммы направленности, $S_{\text{отр_Бок}}$ – отраженный сигнал, принимаемый в опорном канале по боковому лепестку диаграммы направленности, A_1, A_2, A_3, A_4 – амплитуды, соответственно, выше перечисленных сигналов, f_0 – несущая частота сигнала, f_d – доплеровский сдвиг частоты, τ – задержка отраженного сигнала относительно прямого.

На входе антенны приемного канала происходит интерференция сигналов $S_{\text{прям_Бок}}$ и $S_{\text{отр_Гл}}$, а на входе антенны опорного канала интерференция сигналов $S_{\text{прям_Гл}}$ и $S_{\text{отр_Бок}}$. На вход сумматора поступает сигнал с выхода детектора мощности, а также сигнал компенсации, который может быть записан в виде:

$$S_{\text{комп}} = K \cdot (S_{\text{прям_Гл}} + S_{\text{отр_Бок}}),$$

где: $K = A_1 / A_2$, K – коэффициент, характеризующий ослабление принятого прямого сигнала в опорном канале, для компенсации прямого сигнала принимаемого в приемном ка-

нале.

На выходе сумматора сигнал может быть записан в виде:

$$S_{вых_сумм} = K \cdot (S_{прям_Гл} + S_{отр_Бок}) + S_{прям_Бок} + S_{отр_Гл} = S_{отр_Гл} + S_{отр_Бок}$$

Теоретически, опорный сигнал в приемном канале может быть полностью скомпенсирован, однако на практике данный метод имеет ряд ограничений. Уровень компенсации будет зависеть от точности настройки элементов компенсирующего тракта, а также от точности оценки мощности в детекторах. Кроме этого, в приемный канал поступает множество сигналов, отраженных от земной поверхности, а также от окружающих объектов, которые не будут скомпенсированы.

Экспериментальная проверка предлагаемого метода

Проведена экспериментальная проверка предложенного метода. Для проведения эксперимента была собрана экспериментальная установка, имитирующая условия работы пассивного радара.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Схема экспериментальной установки

В качестве источника сигналов использовался двухканальный генератор сигналов Agilent M8190A. Первый из каналов генератора используется для имитации прямого сигнала от передатчика, второй из каналов используется для имитации сигнала, отраженного от радиолокационной цели. В передающем пункте использовались направленные рупорные антенны, а в приемном – широконаправленные. Передающие и приемные антенны располагаются на расстоянии 5 метров. Поглощающий материал использовался для дополнительной изоляции опорного и приемного каналов. Система компенсации включает в себя компенсационный трансформатор, перестраиваемую линию задержки, сумматор. После прохождения компенсационного тракта сигнал принимается и регистрируется анализатором спектра R&S FSV.

Методика проведения эксперимента

Формируется OFDM сигнал полосой 10 МГц, длительностью 100 мкс.

Генератор содержит 2 канала. В первом канале передается сигнал имитирующий сигнал источника излучения. Во втором канале передается сигнал, имитирующий сигнал, отраженный от радиолокационной цели.

Параметры сигналов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры исследуемой радиолокационной системы

Параметр	Опорный сигнал	Отраженный сигнал
Задержка	0 нс,	400 нс,
Мощность на входе передающей антенны	0 дБм,	-60 дБм
Доплеровский сдвиг частоты	0 Гц,	4 кГц,

Опорный и отраженный сигналы излучаются, соответственно, антеннами 1 и 2 и принимаются антеннами 3 и 4. Фотографии передающего и приемного пунктов приведены на рисунке 4.

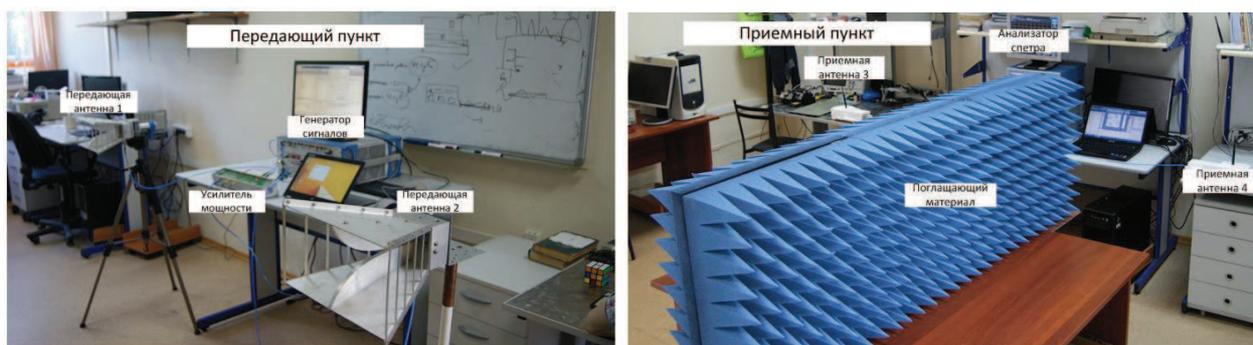


Рисунок 4. Фотографии передающего и приемного пунктов

Опорный и отраженный сигналы поступают как в антенну 3, так и в антенну 4, поглощающий материал используется для уменьшения просачивания опорного сигнала в приемный канал и отраженного сигнала в опорный канал. Мощности принимаемых в антеннах 3 и 4 сигналов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Мощность сигналов на входе приемника в опорном и приемном каналах

Р _{пр} опор антенна 3	Р _{пр} опор антенна 4	Р _{пр} отр антенна 3	Р _{пр} отр антенна 4
-31	-46	-106	-91

С выхода антенны 3 сигнал поступает на вход компенсационного трансформатора, где сигнал инвертируется [11], после чего сигнал поступает на вход перестраиваемого аттенюатора, где производится ослабление сигнала. С выхода аттенюатора сигнал поступает на вход сумматора, где складывается с сигналом с выхода антенны 4. Фотография системы компенсации приведена на рисунке 5.

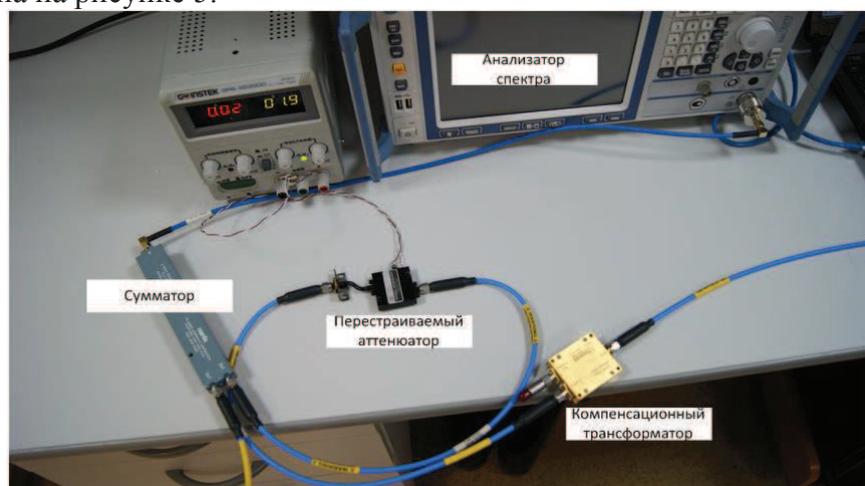


Рисунок 5. Тракт компенсации

Длины кабелей, положение антенн, а также настройка перестраиваемого аттенюатора производились в ручном режиме, таким образом, чтобы опорные сигналы, принимаемые антеннами 3 и 4, имели одинаковую задержку и мощность, но при этом были в противофазе.

С выхода сумматора сигнал поступает на вход анализатора спектра, с помощью которого производится регистрация и анализ сигнала.

Эксперимент производился для 2 случаев:

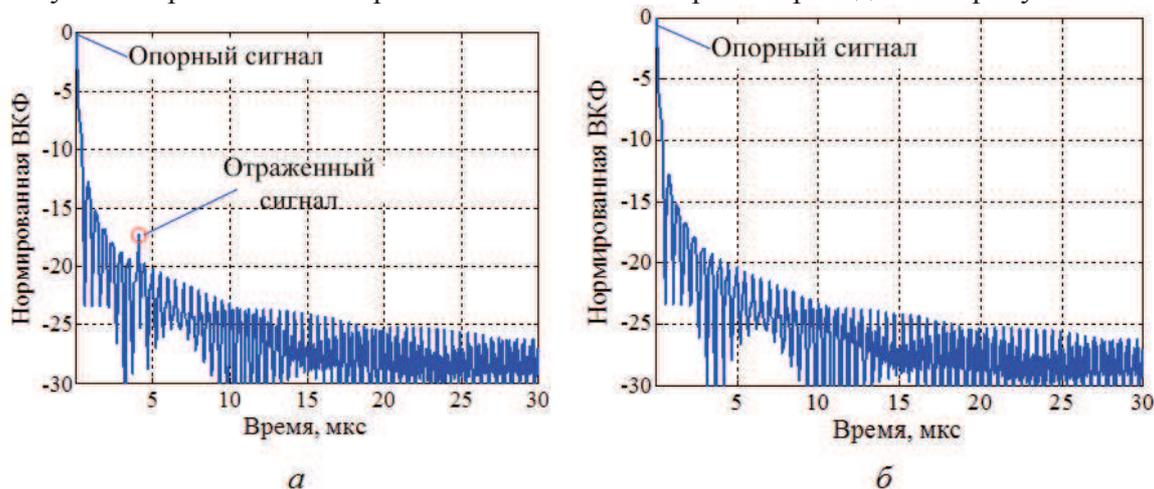
1. В первом случае передатчик отраженного сигнала выключается и производится регистрация только опорного сигнала. Сравняются мощности сигнала до и после компенсации, производится подстройка перестраиваемого аттенюатора для достижения максимальной компенсации.
2. Во втором случае включаются как передатчик опорного, так и передатчик отраженного

сигнала. Анализатором спектра регистрируется принимаемый сигнал при включенной и отключенной системе компенсации. После чего производится обработка сигнала.

Обработка экспериментальных данных

1. В первом случае, путем подстройки перестраиваемого аттенуатора удалось добиться компенсации опорного сигнала в приемном тракте до 30 дБ.
2. Во втором случае с помощью программного пакета Matlab производилась обработка регистрируемого сигнала. Производился расчет ВКФ принятого сигнала с опорным, при включенной и выключенной системе компенсации сигнала.

Результаты расчета ВКФ принятого сигнала с опорным приведены на рисунке 6.



**Рисунок 6. ВКФ принятого сигнала с опорным: а) при наличии компенсации
б) при отсутствии компенсации**

Выводы

В результате проведенного исследования показана возможность использования предложенного метода компенсации в пассивных радиолокационных системах. В рамках проведенного исследования удалось достигнуть уровня компенсации прямого сигнала до 35 дБ. Поскольку эксперимент проводился внутри помещения, данный показатель ограничивается мощностью переотраженных лучей. На уровень компенсации оказывает влияние точность настройки элементов компенсирующего тракта. Эффективность данного метода может быть выше при уменьшении мощности переотраженных лучей, а также высокоточной настройке элементов компенсирующего тракта. Применение подобной системы компенсации позволяет снизить требования к элементам приемного тракта, в частности к динамическому диапазону усилителей и АЦП.

Литература

1. Радиолокация по сигналам сторонних источников: современное состояние. Ч. 1 / А.В. Бархатов [и др.] // Инновации. - 2013. - № 9. - С. 114 – 119.
2. Преимущества многопозиционных РСА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rrdlab.com/preimushhestva-mnogopozicionnyh-rsa/>, свободный (дата обращения 9.03.2013).
3. Ворошилин Е.П., Шарыгин Г.С., Миронов М.В., Громов В.А. Повышение точности определения координат разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – Т. 22, № 2. Ч.2. – С. 14 – 16.
4. Jiabing Z., Liang T., Yi H. A direct path interference cancellation approach to passive radar based on FM radio transmitter //Electro/information Technology, 2006 IEEE International Conference on. – IEEE, 2006. – С. 55 – 59.

5. Harms H.A., Palmer J.E., Searle S.J., Davis L.M. Impact of quantization on passive radar target detection. In Proceedings of the IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012), pages 1–6, October 2012.
6. Ворошилин Е.П., Коротков Д.А., Вершинин А.С. Алгоритм управления мощностью для системы широкополосного беспроводного доступа стандарта WiMAX IEEE 802.16e. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – Т. 24, № 2. Часть 1. – С. 92 – 96.
7. Охрименко А.Е., Пархоменко Н.Г., Семашко П.Г. Методы подавления прямого сигнала в радиолокаторах с подсветом от широкополосных передатчиков // Электромагнитные волны и электронные системы, № 5, 2011.
8. Воробьев Е. Н. особенности использования полуактивных РЛС для мониторинга акваторий в целях предотвращения ЧС // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. – №. 9 (146).
9. Jiabing Z., Liang T., Yi H. Adaptive beamforming passive radar based on fm radio transmitter, in CIE '06 International Conference on Radar, Oct. 2006, pp. 1 – 4.
10. Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Мещеряков А.А. Экспериментальная проверка алгоритма аппроксимации диаграммы направленности антенной системы // Известия Томского политехнического университета (Томск). – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 90 – 94.
11. Wan H., Li S., Wang Z. Direct Path Interference Cancellation in FM Radio-Based Passive Radar // Signal Processing, 2006 8th International Conference on. – IEEE. – Т. 1.
12. Balun Basics Primer [электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.markimicrowave.com/assets/appnotes/balun_basics_primer.pdf свободный (дата обращения 9.03.2013).