

О ВАРИАНТАХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В. И. Поляков¹, С. С. Дереченник², В. В. Буслюк^{1,2},
О. О. Латий¹, Д. А. Луцкий^{1,2}

¹ ОАО «Цветотрон», Брест, Беларусь, vbusliuk58@gmail.com

² Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
cm@brest.by

The article examines some developments by a research group comprising university professors, scientists, and engineers, focusing on the advancement of radar technology. Collaborative efforts from specialists in diverse fields enabled them to address the common goal of enhancing the capabilities of radar systems in the presence of both natural and artificial interference. Specific examples demonstrate that expanding the spectrum of probing signals and employing specialized processing of a packet of radio pulses can increase the resolving power of radar systems in terms of range and target speed, while also providing compensation for passive interference. The article includes structural diagrams of devices designed to shield radar systems from passive interference as illustrative examples. The modern state of digital technologies allows for efficient implementation of these solutions utilizing a new element and software-technical base. This highlights their relevance for designers of mobile systems operating in interference environments, encompassing data transmission, telemetry, radio detection, radio control, and other applications across various sectors of the economy.

*В память о друзьях-товарищах, докторах наук,
профессорах – генерале В.В. Литвинове, генерале
В.В. Фединине, Д.И. Леховицком.*

Предисловие

Одному из авторов статьи в 60-90-е годы прошлого столетия довелось служить в Артиллерийской радиотехнической академии Советской Армии им. Маршала Советского Союза Л.А.Говорова (АРТА)¹, на кафедре всемирно известного специалиста по радиолокации Я.Д.Ширмана. Кафедра в те годы была кузницей научных кадров высшей квалификации.

Одним из главных направлений развития радиолокационной техники в то время была её помехоустойчивость. Это направление не утратило актуальности и в настоящее время, особенно на фоне совершенствования методов и средств разрушения информации (радиоэлектронной борьбы). Наряду с использованием широкополосных сигналов для расширения возможностей РЛС, в том числе

¹ Впоследствии – Военная инженерная радиотехническая академия (ВИРТА) ПВО имени Говорова Л.А.; Харьковский национальный университет Воздушных Сил (ХНУВС) имени Ивана Кожедуба

и для повышения помехоустойчивости, в 60-х годах появились основополагающие работы по автоматической компенсации помех [1]. В группу специалистов по разработке вопросов защиты РЛС от помех тогда входили, помимо авторов изобретений [2–5], профессора Ширман Я.Д. и Красногоров С.И., а также Манжос В.Н., Литвинов В.В., Фединин В.В. и другие.

В издаваемой в те годы в АРТА газете неоднократно появлялась информация о достижениях изобретателей, о работе так называемого конструкторского бюро кафедры (фото на рисунке 1), в составе которого успешно трудились будущие доктора технических наук, профессора Литвинов В.В., Фединин В.В. и Леховицкий Д.И.



Рисунок 1 – На фото сидят (справа налево): п/п-к В.В.Литвинов, п/п-к В.И.Поляков, инженер В.Н.Донец, майор В.В.Фединин; стоят (справа налево): инженеры В.И.Каминский, Д.И.Леховицкий, Л.В.Нечаев

В память об безвременно ушедших от нас, упомянутых выше ученых СССР, Литвинове В.В., Фединине В.В. и Леховицком Д.И. подготовлен этот научный доклад, который основан на нескольких совместных с ними работах, направленных на повышение эффективности работы РЛС в условиях воздействия помех.

Приведенные в докладе варианты построения помехозащищенных РЛС могут, с одной стороны, заинтересовать разработчиков помехозащищенной радиоаппаратуры, с другой – преподавателей и студентов вузов по специальностям радиоэлектронного профиля. Впоследствии, в 2009-2020 гг. автор продолжил работу на кафедре электронных вычислительных машин и систем Брестского государственного технического университета, где в учебные планы специальностей Промышленная электроника и Программируемые мобильные системы были введены новые учебные дисциплины «Радиоэлектронная

системотехника», «Помехоустойчивость радиоэлектронных систем». При этом упомянутые выше наработки, адаптированные к современным методам цифровой обработки сигналов, используются для подготовки необходимой учебно-методической литературы [6, 7].

Брест, октябрь 2024

В.И.Поляков

Формирование широкополосных сигналов для РЛС

Применение сложных широкополосных сигналов является одним из путей повышения помехоустойчивости различных радиотехнических, в том числе радиолокационных систем. Известные формирователи широкополосных сигналов содержат последовательно соединенные гетеродин, синхронизатор, генератор радиоимпульсов, сумматор, смеситель и линию задержки, выход которой подключен ко второму входу сумматора (образуя, тем самым, кольцевой рециркулятор). Однако при этом не обеспечивается необходимая стабильность частоты и фазы.

Для повышения стабильности в предложенном формирователе широкополосных сигналов между выходом синхронизатора и входом смесителя введены формирователь тактовых импульсов и управляемый фазовращатель [2], как показано на рисунке 2.

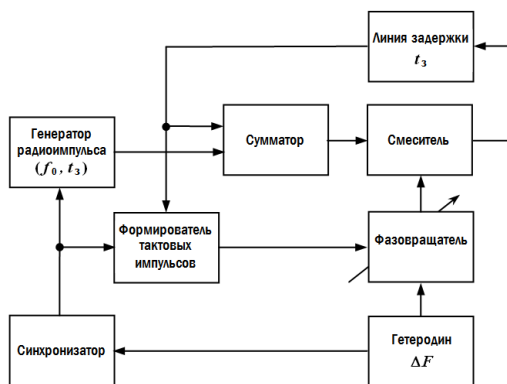


Рисунок 2 – Схема формирователя широкополосных сигналов

Формирователь работает следующим образом. Генератор радиоимпульсов вырабатывает «гладкий» радиоимпульс длительностью t_3 на несущей частоте f_0 . Через сумматор он поступает на смеситель, где за счет гетеродина сдвигается по частоте f_0 на величину ΔF и подается на вход линии задержки.

Радиоимпульс с задержкой t_3 через сумматор вновь поступает на смеситель. После многократных циркуляций образуется сигнал с частотой, ступенчато изменяющейся на величину ΔF через промежутки времени, равные t_3 . Управляемый фазовращатель устанавливается в такое первоначальное состояние,

при котором смежные циркулирующие импульсы сфазированы. Пусть в таком сигнале необходимо осуществить манипуляцию фазы. Для этого включается формирователь тактовых импульсов, а с него тактовые импульсы поступают на управляемый фазовращатель.

Период следования тактовых импульсов равен времени задержки циркулирующего импульса в кольце рециркулятора (это время практически равно длительности t_3 задержки в линии). Тогда каждый тактовый импульс в моменты времени $t_3, 2t_3, 3t_3, \dots, Nt_3$ изменяет состояние управляемого фазовращателя, вследствие чего условие фазирования смежных циркулирующих импульсов нарушается на заранее установленную величину $\Delta\phi$. Ступенчато изменяющийся по частоте сигнал становится также манипулированным по фазе. Кольцо рециркулятора изменяется в начале каждого периода развертки формирователя, а период следования тактовых импульсов устанавливается равным измеренному значению, в результате период следования тактовых импульсов совпадает со временем задержки в кольце. Для этого импульс, вырабатываемый синхронизатором для запуска генератора радиоимпульса, одновременно поступает в формирователь тактовых импульсов, определяя начало отсчета временного интервала. Через некоторое время, равное времени задержки в кольце рециркулятора, на второй вход формирователя тактовых импульсов поступает циркулирующий импульс. Измеренное таким образом время задержки кольца рециркулятора запоминается на весь период развертки формирователя, в течение которого оно практически остается постоянным.

Если генератор радиоимпульса вырабатывает линейный частотно-модулированный (ЛЧМ) радиоимпульс, то формируемый широкополосный сигнал является ЛЧМ-сигналом. В результате работы формирователя тактовых импульсов и управляемого фазовращателя можно получить ЛЧМ-сигнал с манипуляцией фазы в моменты времени $t_3, 2t_3, 3t_3, \dots, Nt_3$.

Использование блока тактовых импульсов и управляемого фазовращателя выгодно отличает предложенный формирователь от известных, так как становится возможным формирование при помощи одного и того же формирователя следующих типов сигнала: частотно-манипулированный, частотно-фазо-манипулированный, линейно-частотно-манипулированный, линейно-частотно-модулированный с манипуляцией фазы. Режим работы формирователя изменяется импульсами синхронизатора.

Селекция движущихся целей РЛС

Устройства для селекции движущихся целей в своей базовой конфигурации содержат линии задержки с множителем задержанного и незадержанного сигнала. Несовпадающие во времени импульсы несинхронной помехи от неподвижных предметов подавляются, а сигналы цели проходят. Однако отсутствие накопления сигнала приводит к увеличению количества «слепых» скоростей². При этом отраженный сигнал не меняет своей полярности

² «Слепыми» скоростями называются скорости цели, при которых накопление фазового сдвига за период следования импульсов кратно 2π .

на выходе устройства череспериодной компенсации, а значит, компенсируется, как и сигнал от неподвижного объекта. По этой причине в устройство дополнительно вводят накопитель, сумматор, а также управляемые дискретизаторы и весовой перемножитель. Сигнал с выхода сумматора по обратной связи через линию задержки и дискретизатор попадает на его вход. Однако и такое устройство имеет недостаточную помехоустойчивость.

Для повышения помехоустойчивости в устройство для селекции движущихся целей предложено включить, между выходом весового перемножителя и входом накопителя, дополнительную линию задержки и элемент «И». Второй вход элемента «И» при этом подсоединяется к выходу весового перемножителя через амплитудный детектор, селектор по длительности и формирователь строб-импульсов.

Предложенное устройство, схема которого представлена на рисунке 3, работает следующим образом [3]. Входы управления дискретизаторов (2) и (6), весового перемножителя (4) соединены с выходами блока управления (7). Отраженного от цели сигнала – пачка импульсов, длительность которой составляет M -дискрет, где M – число импульсов в пачке.

Сигнал от цели после прохождения через дискретизатор (2), сумматор (3) с цепью обратной связи, содержащей линию (5) задержки и дискретизатор (6), попадает в перемножитель (4). Для подавления несинхронных импульсных помех, сигнал с перемножителя (4) обрабатывается последовательно детектором (10), селектором (11) и формирователем строб-импульсов (12), после чего логически складывается элементом «И» (9) с необработанным сигналом с перемножителя (4), задержанным в дополнительной линии (8) задержки, попадая затем в накопитель (1).

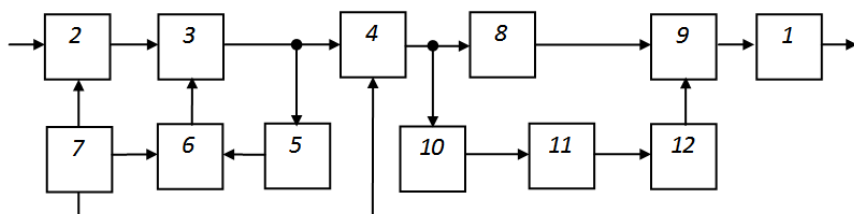


Рисунок 3 – Схема устройства для селекции движущихся целей

Многokратная череспериодная компенсация пассивных помех

Для многократной череспериодной компенсации пассивных помех необходим сумматор, линия задержки, а также инвертор в цепи обратной связи. В многоканальных устройствах такого типа линия задержки требуется в каждом канале, что существенно увеличивает аппаратные затраты. Для сокращения числа линий задержки до одной в предложенном устройстве дополнительно введены модулятор, включенный на входе сумматора, и коммутатор, включенный между выходом сумматора и выходом линии задержки, причем к цепям управления модулятором и коммутатором подключен генератор

команд [4]. На рисунке 4 приведена структурная схема устройства и временные диаграммы, поясняющие его работу.

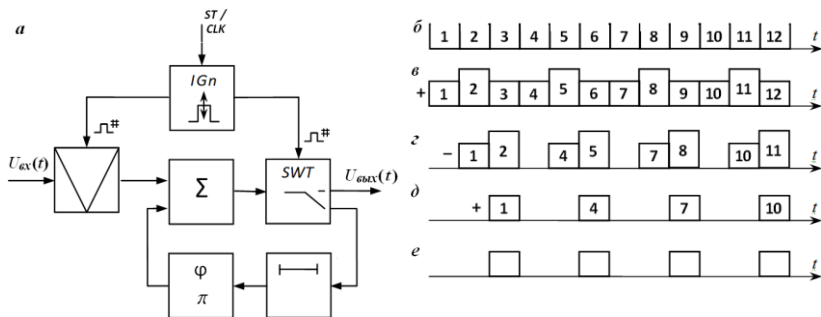


Рисунок 4 – Схема (а) и временные диаграммы работы (б...е) устройства селекции движущихся целей с череспериодной компенсацией помехи

Радиосигналы с выхода приемника поступают на вход модулятора. Согласно номеру периода следования каждому сигналу устанавливается свой вес, определяющий кратность компенсации (рисунок 4б). Закон модуляции формируется генератором команд, который запускается импульсами, поступающими с радиолокатора. Модулированные сигналы поступают на сумматор, а затем через коммутатор – на линию задержки. Задержанные на период следования и сдвинутые по фазе в инверторе на 180° , сигналы поступают на сумматор (рисунок 4в), и вновь на линию задержки, где еще раз задерживаются на один период следования и инвертируются по фазе (рисунок 4г). На время того периода, когда на сумматор поступают дважды задержанные сигналы, коммутатор разрывает цепь обратной связи и подключает выход сумматора к выходу устройства. Переключение коммутатора обеспечивается соответствующей последовательностью импульсов (рисунок 4е) от генератора команд. Напряжение с выхода устройства снимается через каждые два периода на третий, его можно записать таким образом (рисунок 4е):

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(t) - 2U_{\text{вх}}(t - T) + U_{\text{вх}}(t - 2T) .$$

Поскольку в каждом из периодов следования, поступающих на выход устройства, содержатся сигналы трех обрабатываемых периодов, съём напряжения с выхода устройства через два периода на третий практически не ухудшает отношения сигнал/шум, так как, если цель движется с оптимальной скоростью, схема череспериодного вычитания является и накопителем сигналов. При этом сигналы различных периодов накапливаются только в одном из каждых трех периодов следования на выходе устройства. В остальных двух периодах выходного напряжения содержатся в различных сочетаниях уже использованные для накопления входные сигналы различных периодов. Сложение колебаний одних и тех же периодов следования приводит как к накоплению сигнала, так и к накоплению шума.

Череспериодная автокомпенсация пассивных помех

Оптимальная обработка сигнала на фоне пассивных помех и внутренних шумов, в случае пачечного сигнала, сводится к оптимальной обработке каждого импульса и весовой обработке пачки. Весовая обработка осуществляется с помощью линии задержки с отводами, в которые включены элементы, управляемые весовыми коэффициентами (как помеховыми, так и сигнальными). Помеховые весовые коэффициенты формируются с помощью корреляционной обратной связи, а сигнальные – фазовращателями. Для повышения помехоустойчивости дополнительно введена цепь автоматической регулировки усиления (APУ) колебаний гетеродина, используемых для формирования сигнальных весовых коэффициентов [5], как показано на рисунке 5.

Каждый импульс пачки входного сигнала проходит через оптимальный фильтр одиночного импульса и поступает на линию задержки (на длительность пачки). В отводы линии задержки включены объединяемые общим сумматором умножители, которые управляются напряжениями, поступающими от узлов компенсации. Каждый узел компенсации включает перемножитель с интегратором (формируют помеховый весовой коэффициент), фазовращатель (формирует сигнальный весовой коэффициент) и каналный сумматор, объединяющий помеховые и сигнальные весовые коэффициенты.

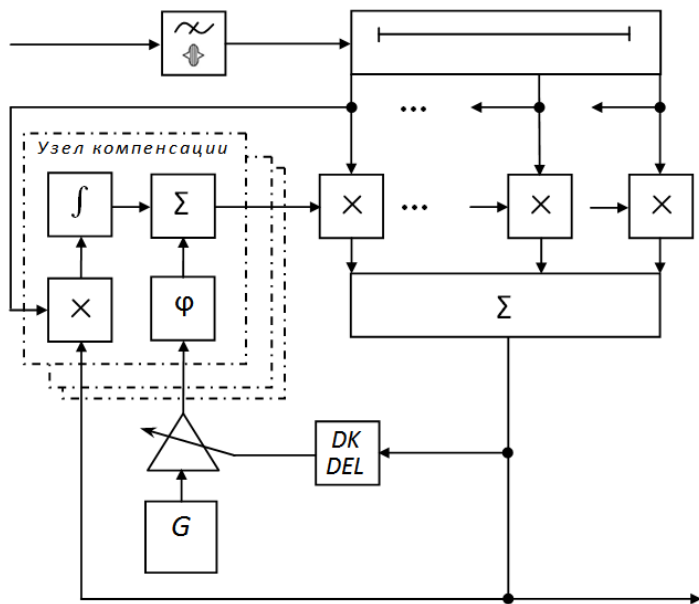


Рисунок 5 – Схема устройства череспериодной автокомпенсации пассивных помех

На каждый узел компенсации подается индивидуальный сигнал, задержанный на соответствующее число междуимпульсных периодов, а также два

общих для всех узлов колебания: суммарное выходное колебание и усиленное колебание гетеродина (коэффициент усиления управляется детектированным и задержанным выходным колебанием). Цепь АРУ, за счет изменения амплитуды сигнальных весовых коэффициентов, стабилизирует величину нескомпенсированных остатков на уровне, превышающем уровень собственных тепловых шумов элементов устройства.

Заключение

Приведенные в докладе оригинальные решения, позволяющие существенно повысить помехоустойчивость РЛС, потенциально применимы для радиоэлектронной системы (РЭС) другого типа. Применение этих и других, в том числе классических, решений в современных РЭС локации, навигации, управления, связи предполагает широкое использование цифровых методов и устройств обработки сигналов. Цифровые технологии обеспечивают резкое повышение точности, быстродействия, пропускной способности и других тактико-технических характеристик РЭС. Применение цифровых средств подразумевает повышение роли не только физических наук (электромагнетизм, оптика, акустика и др.), но и целого ряда математических наук. К их числу относятся: математическая (и техническая) кибернетика, машинная математика, машинное обучение, теория оптимального управления, теория кодирования, теория больших систем и др. При этом важно отметить также наблюдающееся концептуальное развитие классических представлений. Например, для вероятностно-статистического анализа сигналов все шире используют негауссовы модели сигналов и помех, небайесовские процедуры, а также непараметрические статистики. Это обуславливает необходимость усиления соответствующего компонента подготовки обучающихся по специальностям радиоэлектронного профиля.

Список использованных источников

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Ширман Я.Д., Лосев Ю.Н., Минервин Н.Н., Москвитин С.В., Горшков С.А., Леховицкий Д.Н., Левченко Л.С. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Формирователь широкополосных сигналов : АС 628601 СССР / В.И. Поляков, С.Н. Александров. – Оpubл. 15.10.1978.
3. Устройство для селекции движущихся целей : АС 553750 СССР / В.И. Поляков, В.В. Фединин. – Оpubл. 05.04.1977.
4. Устройство для многократной череспериодной компенсации : АС 414554 СССР / В.И. Поляков, В.В. Фединин. – Оpubл. 05.11.1974.
5. Устройство череспериодной автокомпенсации пассивных помех : АС 375806 СССР / В.И. Поляков, В.В. Фединин. – Оpubл. 23.03.1973.
6. Дереченник С.С., Поляков В.И. Радиоэлектронная системотехника : пособие. – Брест: БрГТУ, 2011. – 383 с.
7. Дереченник С.С., Поляков В.И., Дереченник С.С. - мл. Обработка сигналов радиоэлектронных систем : лабораторный практикум. – Брест: БрГТУ, 2012. – 150 с.