

УДК [621.396.96 : 621.1] : 656.61.052

Перспективы использования на судах радиотеплолокаторов в современных условиях судоходства

А.Н. Суслов^{1,2}, А.Х. Пятси¹, Н.В. Калитёнков¹

¹ Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра радиотехники и радиотелекоммуникационных систем;

² Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. В работе рассматриваются особенности теплового радиоизлучения земных объектов, анализируется возможность применения на судах морского флота радиотеплолокаторов для повышения безопасности мореплавания, оценивается эффективность предлагаемых решений.

Abstract. In the paper features of thermal radiation of terrestrial objects have been considered, the opportunity of thermal radars' application on vessels for increase of safety navigation has been analyzed, efficiency of suggested decisions has been appreciated.

Ключевые слова: радиотеплолокатор, имитационное моделирование, безопасность мореплавания
Key words: thermal radar, imitation modelling, navigation safety

1. Введение

Необходимость дальнейшего совершенствования приёмов поддержания безопасности навигации как при освоении запасов углеводородного сырья, так и интенсификации морского транспортного сообщения, требует расширения информационной поддержки судовождения. В целях повышения безопасности мореплавания Международной морской организацией предприняты активные организационные меры, такие, как разработка и ввод в действие новых международных Правил предупреждения столкновений судов в море, установление в районах интенсивного судоходства схем одностороннего движения судов, широкое оснащение судов средствами радиолокационной техники, организация специального обучения судоводителей на радиолокационных тренажёрах. В то же время актуальной задачей остаётся модернизация существующих и внедрение новых методов и систем обеспечения безопасности плавания. Наиболее эффективным из современных технических средств радиотехнической информационной поддержки безопасного судовождения является радиолокатор. Однако современные радиолокаторы не обеспечивают абсолютную надёжность своевременного обнаружения опасных для навигации объектов. Точность этих устройств также часто оказывается недостаточна.

Эффективность использования судовых навигационных радиолокаторов определяется совокупностью их эксплуатационных характеристик, основными из которых являются максимальная и минимальная дальности действия, разрешающая способность по направлению и по дальности, точность измерения координат, зона и время обзора, надёжность. Международной морской организацией предъявлены жёсткие требования к каждой из указанных характеристик рассматриваемых устройств. В последнее время не наблюдается существенного улучшения технических параметров судовых РЛС, несмотря на жёсткую конкуренцию между фирмами-производителями судового навигационного оборудования. По-видимому, это связано с тем, что современный уровень развития техники не в состоянии улучшить качество судовых радиолокаторов без серьёзного повышения их стоимости. При этом в последние годы всё более широкое применение находят радиотеплолокаторы. Перспективным направлением представляется применение этих устройств на судах морского флота, эксплуатируемых в северных и южных приполярных районах.

2. Сравнение эксплуатационных характеристик радиотеплолокаторов и радиолокаторов

Главным отличием радиотеплолокаторов от активных радиолокаторов является отсутствие передатчика, т.е. радиотеплолокатор принимает естественное радиотепловое излучение объектов наблюдения. Это обстоятельство оказывает значительное влияние на достижимые эксплуатационные характеристики в случае применения радиотеплолокатора в составе судового радионавигационного комплекса. Во-первых, для активных судовых РЛС минимальная дальность действия зависит от длительности зондирующего импульса τ_i (в течение этого времени приёмник радиолокатора отключён от антенны) и размеров мёртвой зоны, зависящей от ширины диаграммы направленности антенны и высоты её размещения над уровнем моря. Для современных морских РЛС минимальная дальность действия не

должна превышать 45 м. Указанное требование вступает в противоречие с максимальной дальностью действия, для повышения которой требуется увеличивать $\tau_{и}$. В радиотеплолокаторах минимальная дальность действия будет определяться только размерами мертвой зоны, которая при грамотной установке антенны может быть легко сведена до 20-30 метров.

Вторая важная характеристика судового радиолокатора – максимальная дальность действия. При отсутствии гидрометеоров в атмосфере (дождь, туман, снег) величина этого параметра ограничивается радиогоризонтом (приблизительно 40-45 морских миль). Однако при наличии осадков, особенно в случае дождя и тумана, дальность радиолокационного наблюдения может снижаться более чем в три раза. Учитывая, что в случае применения радиотеплолокаторов распространение сигнала одностороннее, то максимальная дальность действия радиотеплолокаторов в сложных погодных условиях увеличивается приблизительно в четыре раза по сравнению с активными радиолокаторами (зависимость мощности принимаемых радиотеплолокатором сигналов от дальности имеет вид R^2 , тогда как для обычной радиолокации характерна зависимость R^4).

Точность измерения координат целей с помощью радиотеплолокаторов также выше, чем в случае активных судовых РЛС. Последние подвержены такому явлению, как шум цели, т.е. флуктуациям суммарного отражения сигнала во времени, вызванными движением цели относительно РЛС. Тепловое излучение любого объекта не зависит от его движения, а определяется излучательной способностью вещества, из которого он состоит. Точность измерения координат целей радиотеплолокатором будет определяться лишь температурным контрастом цели и фона, а также параметрами антенны устройства.

Разрешающая способность активного радиолокатора по дальности определяется длительностью зондирующего импульса, а по направлению – шириной луча антенны в горизонтальной плоскости. В случае радиотеплолокатора разрешающая способность как по дальности, так и по направлению зависит от характеристик антенной системы (см. выводы, представленные в работе (Караваяев, Сазонов, 1987)). При использовании в качестве антенны радиотеплолокатора фазированной антенной решётки разрешающая способность по дальности будет незначительно хуже на больших дальностях (более 3 морских миль), а на ближних расстояниях будет превосходить аналогичный параметр для активного радиолокатора.

Период обзора пространства для активных радиолокаторов не должен превышать 3 секунд. Учитывая, что ширина луча антенны судового радиолокатора составляет примерно 1° , то время нахождения точечной цели в пределах антенного луча равняется приблизительно 1 мсек. За этот промежуток времени радиотеплолокатор способен обнаружить цель, радиояркостный контраст которой по сравнению с фоном составляет порядка 3° по шкале Кельвина. Опыты показывают, что радиояркостные контрасты большинства земных объектов превышают десятки градусов (см. данные, представленные в работе (Башаринов и др., 1968)). Следовательно, в случае использования на судах радиотеплолокаторов скорость обзора пространства можно повысить приблизительно в десять раз.

Помимо указанных преимуществ радиотеплолокаторов следует отметить, что эти устройства не создают друг другу помех в процессе своей работы. В то же время работа большого количества судовых РЛС в одном диапазоне частот может вызвать мощные взаимные помехи в районах с интенсивным судоходством. Указанные помехи вызывают перегрузку приёмника радиолокатора, создавая серьёзную опасность потери информации обо всей радиолокационной обстановке.

Надёжность работы радиотеплолокаторов также превосходит аналогичный параметр для активной судовой РЛС. Судовой радиолокатор содержит как передатчик, так и приёмник. При этом вероятность отказа передатчика выше, чем вероятность отказа радиоприёмника. Радиотеплолокатор не содержит в своём составе радиопередающего устройства. Для высококачественного измерения координат цели радиотеплолокатор должен содержать несколько десятков приёмных каналов, при этом выход из строя одного или даже нескольких приёмников не приведёт к отказу радиотеплолокатора в целом, а лишь снизится скорость обзора пространства. Отказ же любого из составных узлов активного радиолокатора приведёт к отказу всего устройства.

3. Методы повышения эффективности радиотеплолокаторов

Итак, радиотепловые локаторы имеют ряд указанных выше преимуществ над применяемыми в настоящее время активными навигационными радиолокаторами. Повышение эффективности измерения радиотеплового излучения позволит гарантированно обнаруживать и измерять параметры любых объектов, представляющих опасность мореплавания, а также позволит штурману в некоторых ситуациях более качественно выполнять решение навигационных задач. Например, при плавании в ледовых условиях радиотеплолокатор способен не только обнаруживать местоположение ледовых образований, но анализировать их сплочённость и толщину. Поэтому штурман будет способен выявить направление, в котором сплочённость льда не представляет опасности для судна, и произвести прокладку курса в безопасном направлении через ледовое поле, не обходя его, и тем самым сократить время нахождения судна в пути.

Повышение эффективности радиотеплокаторов связано напрямую с улучшением чувствительности их приёмных устройств. Существующие в настоящее время радиотеплокаторы в своём составе используют приемники, построенные в основном по двум структурным схемам: приёмники прямого усиления и приёмники-супергетеродины. При этом указанные схемы приёмников используются как в модуляционных, так и в корреляционных радиотеплокаторах. В то же время, необходимо отметить, что приёмники, построенные по обеим схемам, имеют определённые недостатки. Приёмники прямого усиления обладают слабой избирательностью, а супергетеродины помимо основного "сигнального" канала приёма имеют и "зеркальный" канал. Кроме этого, операция детектирования, применяемая в приёмниках этих двух классов, также ограничивает их предельно достижимую чувствительность. Дело в том, что информация об интенсивности теплового излучения объектов заложена в амплитуду излучаемых ими радиотепловых сигналов. Из теории радиоприёмных устройств известно, что амплитудный детектор – нелинейное устройство, и наличие на его входе сигнала и помехи приводит к такому эффекту, как подавление помехой сигнала, в случае, если уровень помехи превышает уровень сигнала. Выходное соотношение сигнал – помеха амплитудного детектора связано с аналогичным соотношением на его входе в соответствии с выражением:

$$(P_c/P_n)_{\text{вых}} = k \cdot (P_c/P_n)_{\text{вх}}^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности ($k < 1$).

В зависимости от области применения радиометра соотношение сигнал – помеха на его входе может не превышать 0.1. При таких условиях амплитудный детектор серьезно ограничивает чувствительность приёмника, и её улучшения можно достичь либо увеличением полосы пропускания додетекторного тракта, либо постоянной времени интегратора, стоящего на выходе детектора.

Устранить этот эффект можно, если изменить структуру приёмника следующим образом: в преобразователе частоты частоту гетеродина устанавливаем равной центральной частоте в спектре принимаемого радиотеплового сигнала и после преобразователя выделяем сигнал с разностной частотой. Тем самым мы приходим к структуре приёмника с прямым преобразованием частоты.

Можно ожидать, что при использовании прямого преобразования частоты приёмник радиотеплокатора (радиометр) будет обладать лучшей чувствительностью, так как в этом случае отпадает необходимость использования в приёмнике амплитудного детектора, значительно ухудшающего соотношение сигнал – помеха, и серьёзно ослабить вклад в общие шумы прибора шумов гетеродина. Процесс прямого преобразования частоты происходит без искажения закона модуляции входного сигнала. При этом других существенных изменений схемы модуляционного радиометра не требуется.

Сравнительное исследование чувствительностей модуляционного радиометра-супергетеродина и модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты было произведено с использованием имитационного моделирования в приложении Simulink программного пакета MatLab 6.5. Схемы имитационного моделирования модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты и модуляционного радиометра-супергетеродина приведены на рис. 1.

Результаты имитационного моделирования исследуемых устройств приведены на рис. 2 и 3. В модельных экспериментах были приняты следующие параметры: ширина полосы пропускания додетекторного тракта $\Delta f \approx 6.25$ Гц, постоянная времени фильтра нижних частот на выходе детектора $\tau = 25$ сек, дисперсия внутреннего шума радиометров $\sigma^2 = 6 \cdot 10^{-6}$ (естественно, указанные величины в значительной степени отличаются от имеющихся на практике в реальных радиометрах, однако при указанных номиналах параметров обеспечивается приемлемая скорость вычислительного процесса с полным сохранением адекватности применяемых моделей).

На приведённых графиках кривая 1 соответствует выходному напряжению модуляционных радиометров при наличии на их входе радиотеплового сигнала величиной, составляющей 10 % от мощности внутреннего шума прибора. Выходное напряжение радиометра при увеличении мощности входного сигнала до 30 % от уровня внутреннего шума прибора представлено кривой 2 на рис. 2 и рис. 3. Приведённые результаты моделирования свидетельствуют о том, что в случае прямого преобразования частоты чувствительность модуляционного радиометра улучшается приблизительно в 2 раза по сравнению с модуляционным радиометром-супергетеродином с понижением частоты входного сигнала.

При использовании прямого преобразования частоты в корреляционных радиометрах также наблюдается выигрыш в чувствительности более чем в 2 раза по сравнению с супергетеродинной схемой. Кроме этого, в первом случае значительно упрощается построение устройства-умножителя, необходимого для вычисления взаимокорреляционной функции шумовых сигналов (данная операция легко реализуется после оцифровки выходного сигнала, являющегося низкочастотным по сравнению с выходным сигналом корреляционного радиометра-супергетеродина).

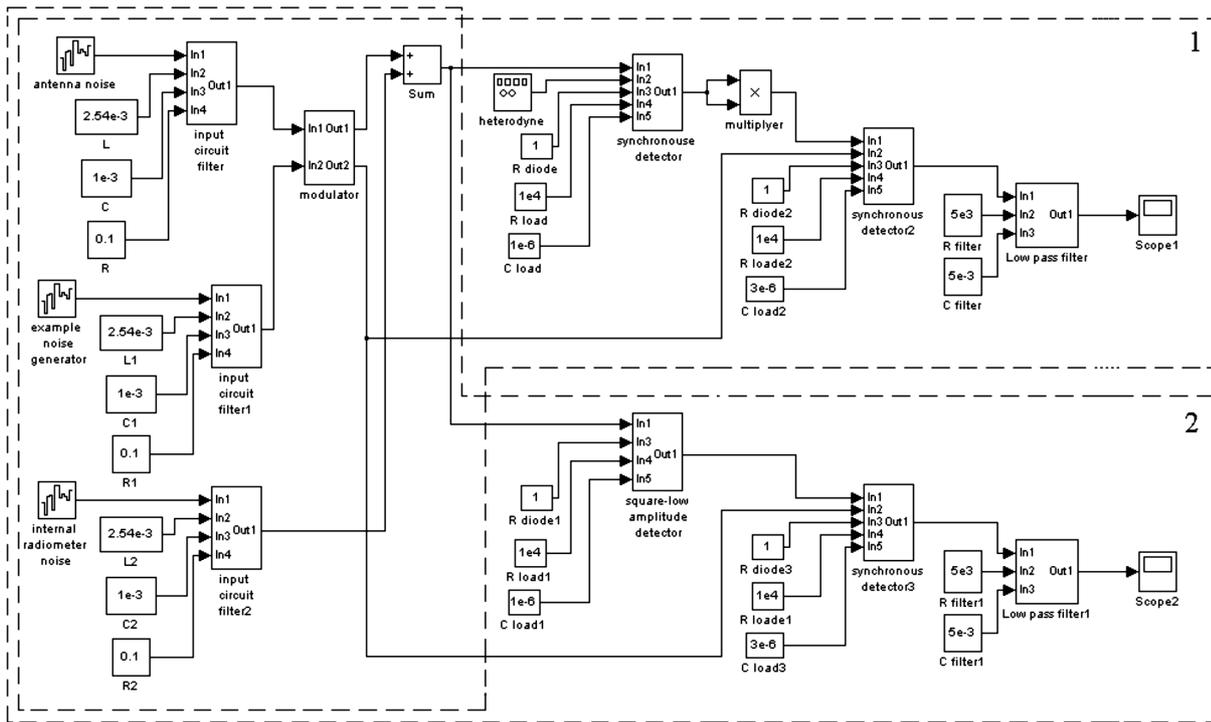


Рис. 1. Схемы имитационного моделирования модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты (1) и модуляционного радиометра-супергетеродина (2)

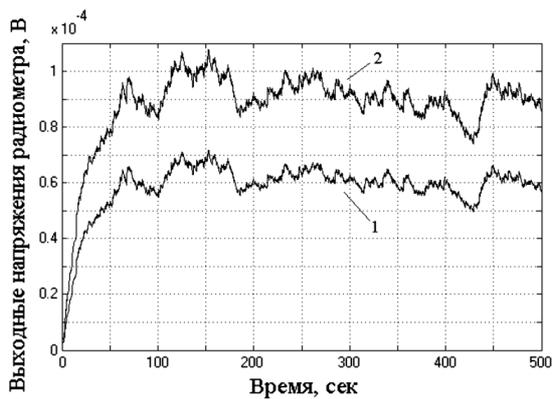


Рис. 2. Выходные сигналы модуляционного радиометра-супергетеродина с понижением частоты входного сигнала

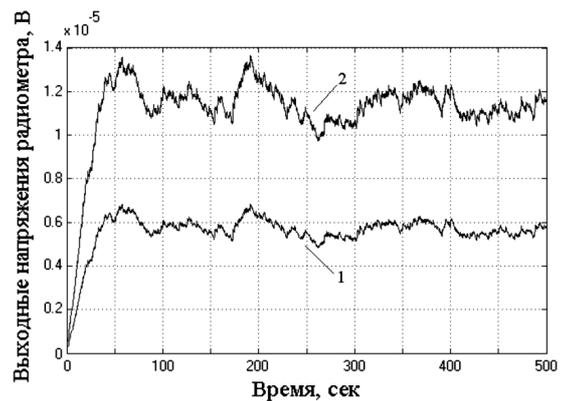


Рис. 3. Выходные сигналы модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты

Вышеприведённые результаты были получены в предположении, что уровень внутреннего шума приёмников с прямым преобразованием частоты равен уровню внутреннего шума приёмника-супергетеродина.

Максимальная точность измерения малых температурных контрастов ограничивается собственными шумами приёмника теплового радиоизлучения и нестабильностью коэффициента усиления.

Собственные шумы радиометра определяются его первыми каскадами (входная цепь, усилитель высокой частоты, преобразователь частоты), среди которых преобразователь частоты обладает наибольшим уровнем шума. Шумовые свойства преобразователя частоты зависят от собственных шумов нелинейного элемента-смесителя (диод, транзистор и т.п.) и шумов гетеродина. Практика показывает, что наименьший уровень шума имеют диодные преобразователи частоты. В диапазоне СВЧ шумы полупроводникового диода обусловлены шумами, связанными с флуктуациями тока, протекающего через p-n переход (дробовой шум), и тепловыми шумами объёмного сопротивления диода. Определение вклада шумов каждого из указанных источников в общий шум преобразователя расчётным путём связано с решением параметрических задач, с решением в общем случае линейных дифференциальных

уравнений с переменными во времени коэффициентами, описывающими свойства всего преобразователя частоты. Решение такой задачи представляет серьезную проблему. Поэтому определение уровня внутреннего шума преобразователя частоты будем проводить методом имитационного моделирования с использованием программ Matlab 6.5 и Orcad 9.2.

Анализ уровня внутреннего шума будем проводить для двух схем: диодного кольцевого преобразователя частоты с преобразованием частоты "вверх" (когда промежуточная частота сигнала на выходе преобразователя больше частоты входного сигнала приёмника $f_{np} > f_c$) и диодного кольцевого преобразователя частоты с прямым преобразованием частоты (в данном случае спектр входного сигнала приёмника линейно переносится в область нулевых частот, $f_{np} = 0$). Кольцевые схемы обладают наилучшими показателями качества преобразования частоты. Экспериментальное исследование уровня тепловых шумов преобразователей будем проводить для температуры окружающей среды равной $t_0 = 27^\circ\text{C}$ ($T_0 = 300 \text{ K}$). Поскольку принцип работы преобразователя частоты один и тот же вне зависимости от частот сигнала и гетеродина, то сравнительный анализ шумов будем вести методом имитационного моделирования на частотах, значительно меньших используемых в радиотеплолокаторах. Принципиальные электрические схемы исследуемых устройств приведены на рис. 4, 5.

При моделировании были установлены следующие параметры исследуемых схем: амплитуда входного сигнала 100 мкВ, амплитуда напряжения гетеродина 1 В, частота входного сигнала 1 МГц, промежуточная частота (для случая преобразования частоты "вверх") 2 МГц, ширина полосы пропускания 40 кГц.

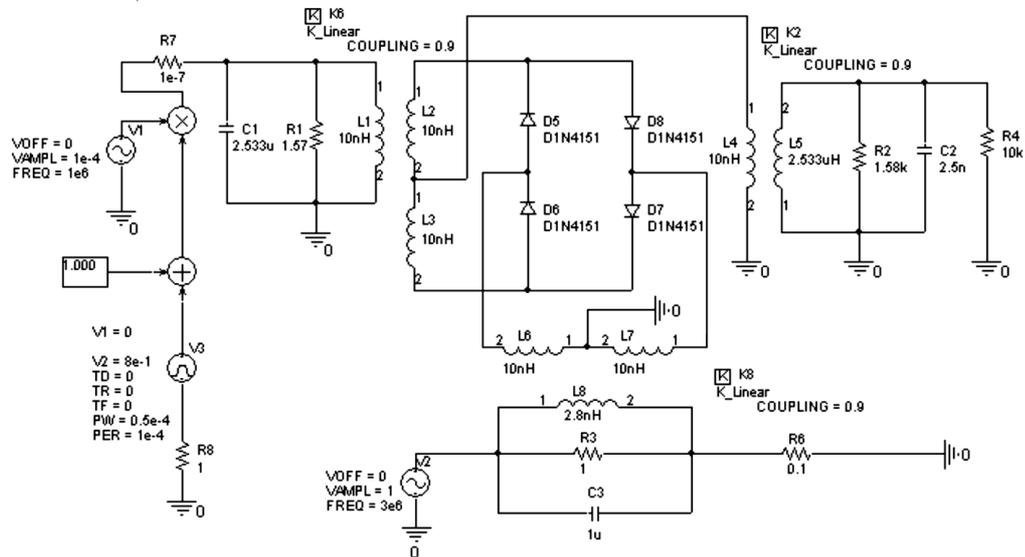


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема кольцевого диодного преобразователя частоты

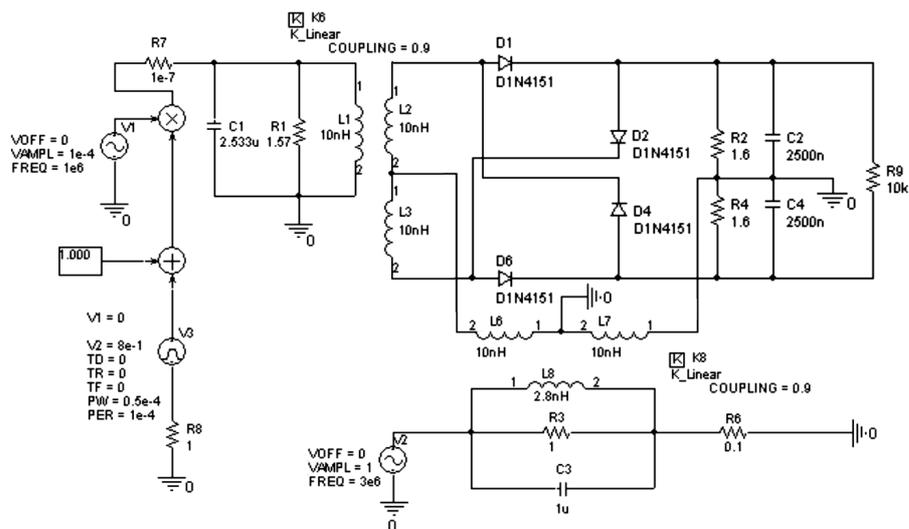


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема кольцевого диодного преобразователя частоты с прямым преобразованием частоты

Результаты моделирования предложенных схем в частотной области приведены на рис. 6-9, а осциллограммы напряжений и мощностей входных и выходных сигналов преобразователей частоты показаны на рис. 10-17. Приведённые графики показывают, что в случае прямого преобразования частоты тепловые шумы диодов приблизительно в 50000 раз меньше, а общие тепловые шумы преобразователя в 20 раз меньше, чем в случае традиционного преобразования частоты "вверх". Кроме того, в случае прямого преобразования частоты общие шумы преобразователя оказываются в 625 раз меньше, чем в случае традиционного преобразования частоты "вверх". В то же время коэффициент передачи по мощности преобразователя с прямым преобразованием частоты приблизительно в 250 раз меньше. Следовательно, по отношению коэффициента передачи по мощности к мощности внутренних шумов преобразователь с прямым преобразованием частоты превосходит традиционный преобразователь частоты "вверх" приблизительно в 2.5 раза.

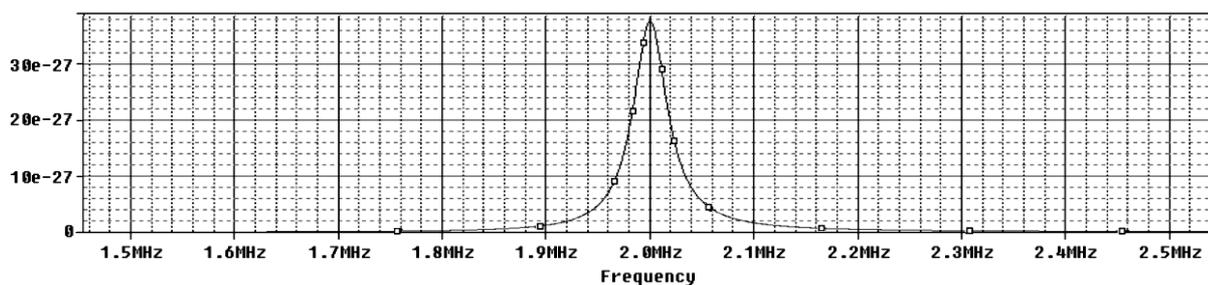


Рис. 6. Спектральная плотность тепловых шумов диодов D5-D8 в случае преобразования частоты "вверх"

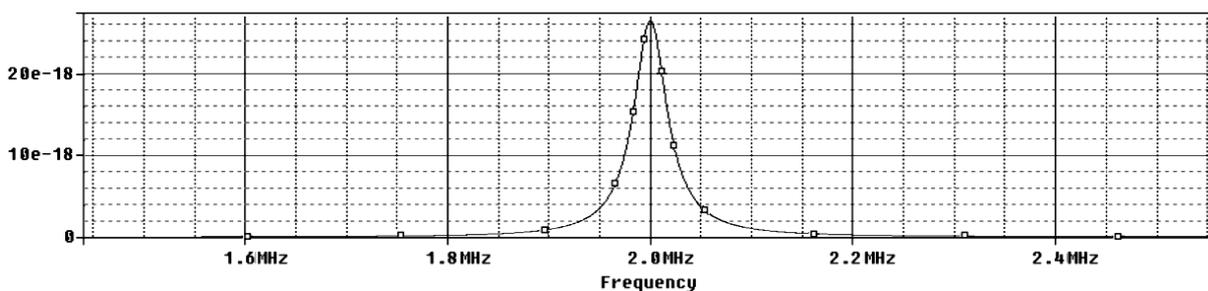


Рис. 7. Спектральная плотность тепловых шумов резистора R2 в случае преобразования частоты "вверх"

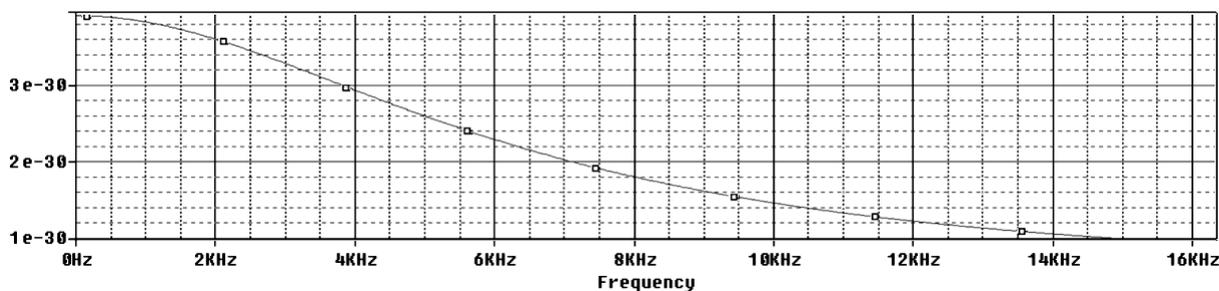


Рис. 8. Спектральная плотность тепловых шумов диодов D5-D8 в случае прямого преобразования частоты

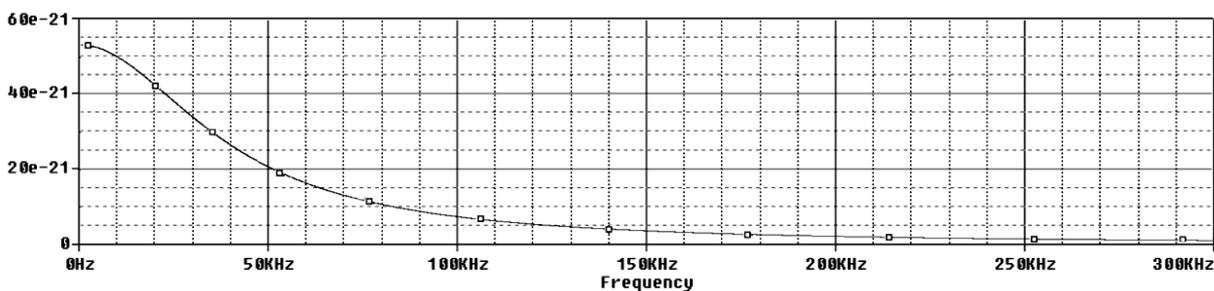


Рис. 9. Спектральная плотность тепловых шумов резисторов R2, R4 в случае прямого преобразования частоты

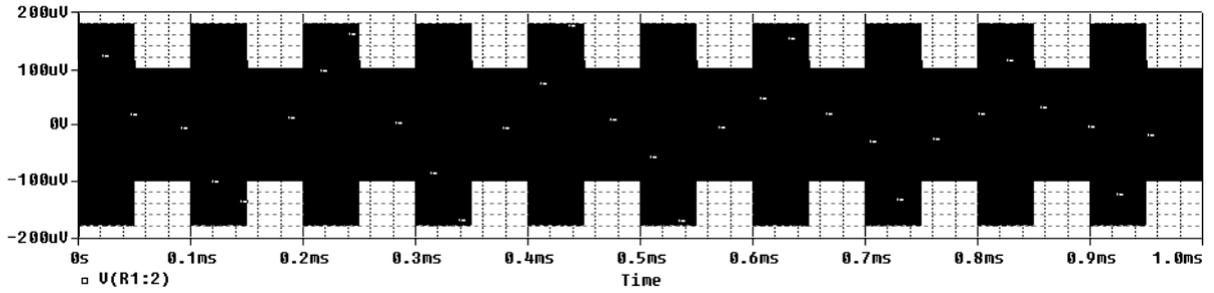


Рис. 10. Осциллограмма напряжения на входе традиционного кольцевого диодного преобразователя частоты

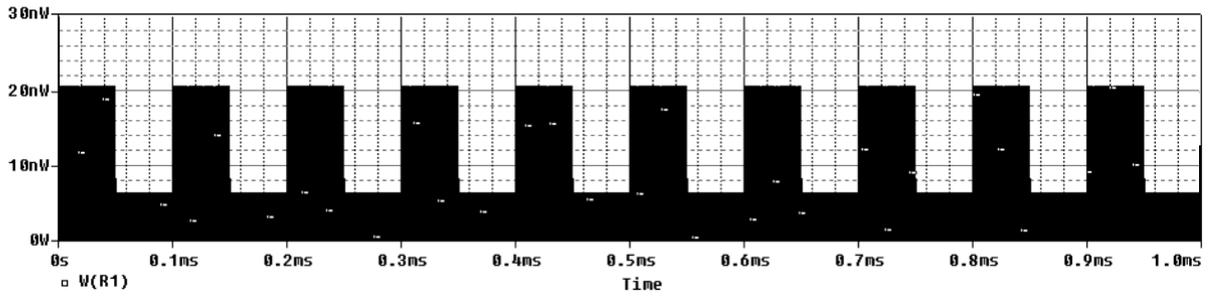


Рис. 11. Осциллограмма мощности сигнала на входе традиционного кольцевого диодного преобразователя частоты

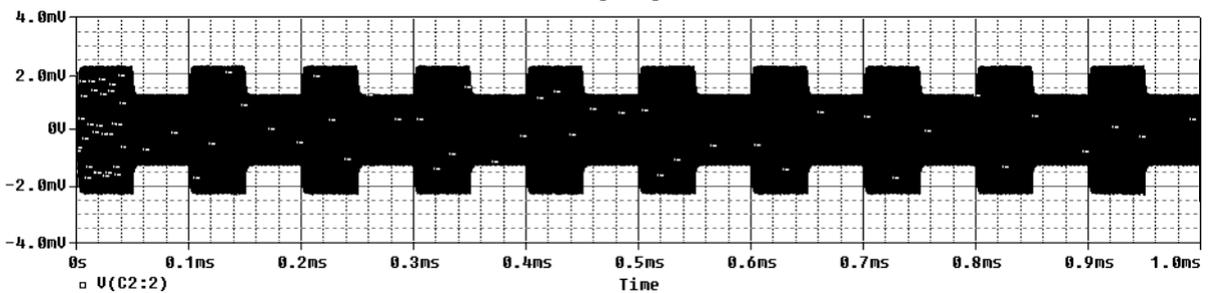


Рис. 12. Осциллограмма напряжения на выходе традиционного кольцевого диодного преобразователя частоты

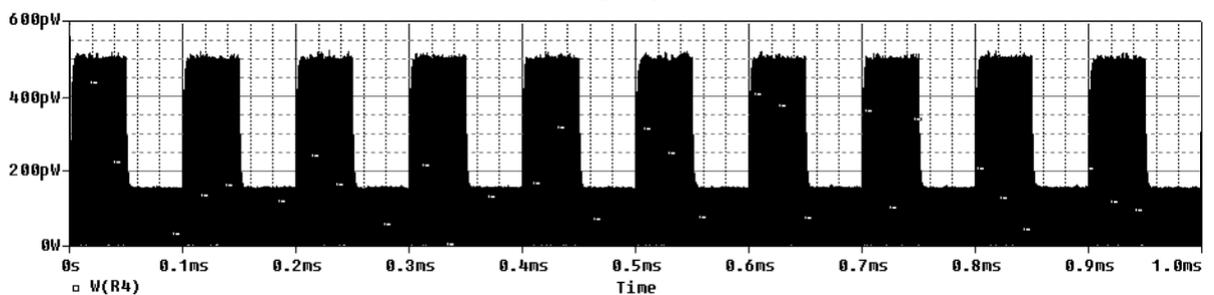


Рис. 13. Осциллограмма мощности сигнала на выходе традиционного кольцевого диодного преобразователя частоты

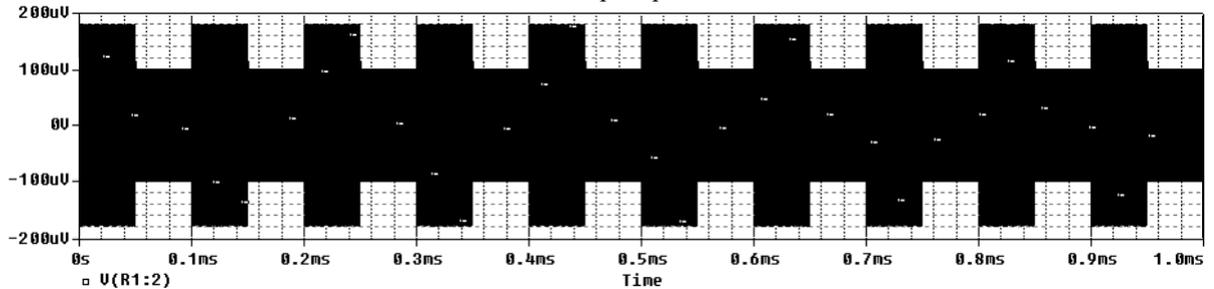


Рис. 14. Осциллограмма напряжения на входе кольцевого диодного преобразователя с прямым преобразованием частоты

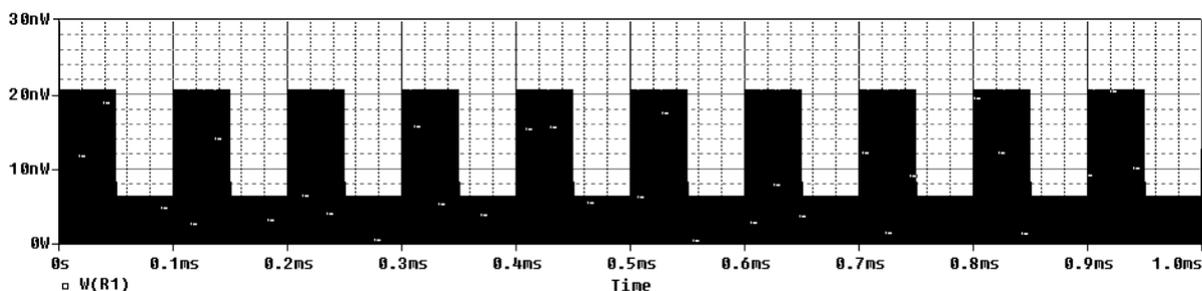


Рис. 15. Осциллограмма мощности сигнала на входе кольцевого диодного преобразователя с прямым преобразованием частоты

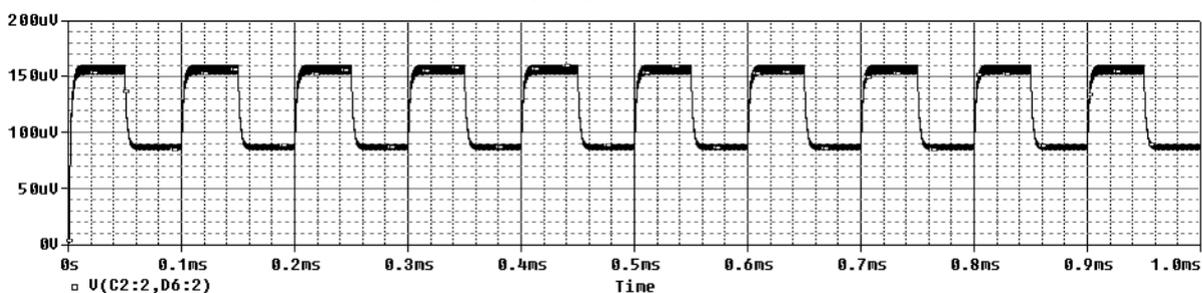


Рис. 16. Осциллограмма напряжения на выходе кольцевого диодного преобразователя с прямым преобразованием частоты

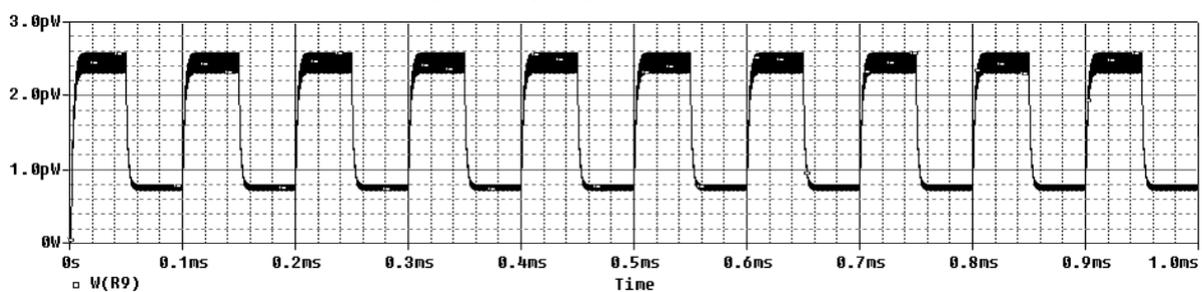


Рис. 17. Осциллограмма мощности сигнала на выходе кольцевого диодного преобразователя с прямым преобразованием частоты

При проведении вышеописанных исследований не был учтён шум, вносимый гетеродином. Вследствие различных причин период колебаний гетеродина не строго постоянен, он хаотически колеблется, т.е. генерируемое напряжение имеет флуктуирующую фазу. Пределы флуктуации невелики, обычно они не превышают тысячных долей градуса. Амплитуда генерируемых колебаний тоже не совершенно постоянна, т.е. напряжение гетеродина имеет небольшую (с глубиной в доли процента) амплитудную модуляцию. В результате колебания гетеродина представляются не чистой спектральной линией, а спектром из основного колебания и боковых полос.

Проведём сравнительный анализ вклада шумов гетеродина в шумы преобразователя частоты при традиционном преобразовании частоты и прямом преобразовании частоты.

При одинаковых параметрах плеч преобразователей частоты шумы гетеродина компенсируются, и на выходе приборов образуется напряжение, обусловленное действием сигнала на входе. На практике невозможно обеспечить точную балансировку преобразователей, и в результате шумы гетеродина проникают на выход устройства и складываются с полезным сигналом, тем самым ухудшая выходное соотношение сигнал-помеха.

Известно, что шумы гетеродина сосредоточены в частотной полосе вблизи его центральной частоты, ширина которой определяется амплитудно-частотной характеристикой резонансной системы гетеродина. В процессе преобразования сигнала из всей полосы частот гетеродина на выход преобразователя проникают составляющие шумов, лежащие в области частоты $f = f_c - f_{np}$.

Эффективным средством борьбы с шумами гетеродина является применение высокой промежуточной частоты. Однако в супергетеродинных радиометрах миллиметрового диапазона использование сверхвысоких промежуточных частот связано со значительными трудностями при построении гетеродина на частоты, превышающие 100 ГГц. Поэтому практически все существующие в

настоящее время радиотеплолокаторы используют низкие промежуточные частоты, ослабляя влияние шумов гетеродина применением балансных и кольцевых схем. Поскольку принцип работы преобразователя частоты не зависит от частот сигнала и гетеродина, то исследование вклада шумов гетеродина будем также вести методом имитационного моделирования на частотах значительно меньших используемых в радиотеплолокаторах.

На рис. 18, 19 представлены, соответственно, имитационные модели исследования вклада шумов гетеродина в шумы преобразователя частоты при традиционном преобразовании частоты и прямом преобразовании частоты. Для исследования влияния неточной балансировки плеч преобразователей частоты в имитационные модели был внесён разброс параметров величиной в 1 %. Результаты экспериментов приведены на рис. 20, 21.

Приведённые графики показывают, что в случае неидеальной балансировки при прямом преобразовании частоты вклад шумов гетеродина в общий шум преобразователя подавлен сильнее по сравнению с обычным преобразованием частоты (в приведенном эксперименте приблизительно в 400 раз).

Показанный выше эффект можно объяснить следующими причинами. Напряжение шумов гетеродина сосредоточено в основном вблизи центральной частоты его резонансной системы. На выход преобразователя частоты проникают те спектральные составляющие шума гетеродина, которые прилегают к частоте входного сигнала. В случае прямого преобразования частоты практически весь шум гетеродина проникает на выход преобразователя.

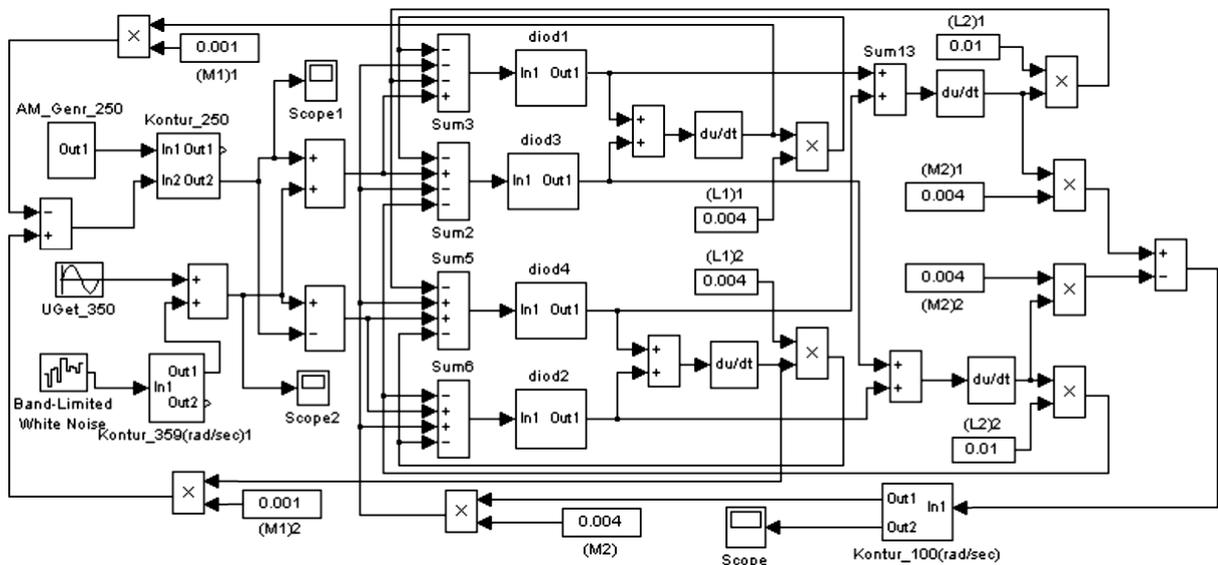


Рис. 18. Имитационная модель кольцевого диодного преобразователя частоты

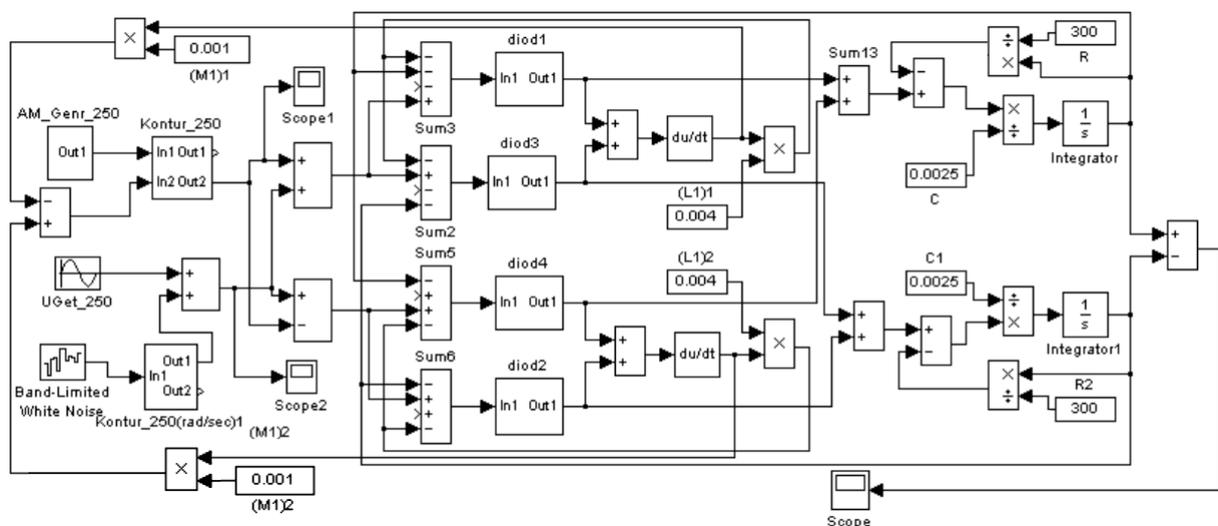


Рис. 19. Имитационная модель кольцевого диодного преобразователя частоты с прямым преобразованием частоты

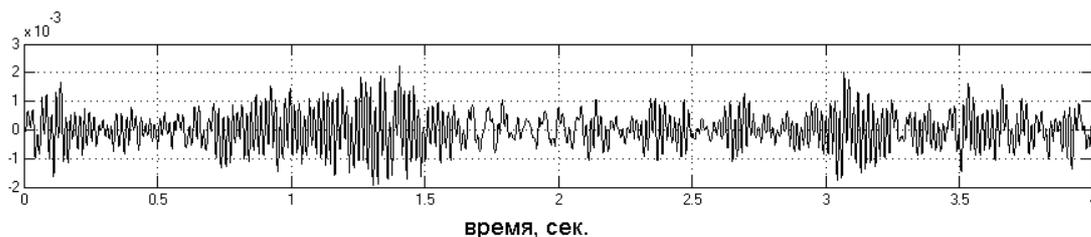


Рис. 20. Вклад шумов гетеродина в кольцевом диодном преобразователе частоты с учётом неполного баланса плеч схемы

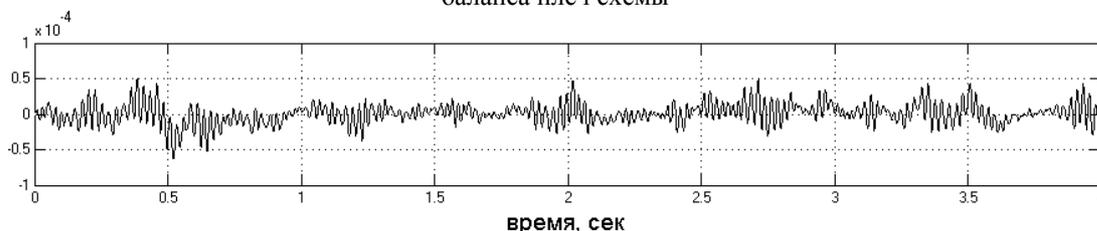
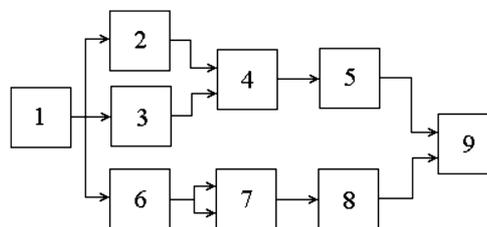


Рис. 21. Вклад шумов гетеродина в кольцевом диодном преобразователе частоты с прямым преобразованием частоты с учётом неполного баланса плеч схемы

Рис. 22. Имитационная модель исследования степени корреляции шумовых компонентов шума гетеродина

- 1 – генератор "белого" шума;
- 2, 3, 6 – частотный фильтр;
- 4, 7 – умножитель;
- 5, 8 – фильтр нижних частот;
- 9 – делитель.



Однако те компоненты шума гетеродина, которые находятся вблизи центральной частоты его резонансной системы, обладают значительной взаимной корреляцией. Для исследования степени корреляции шумовых компонентов напряжения гетеродина воспользуемся имитационной моделью, изображённой на рис. 22.

Принцип работы предложенной схемы заключается в следующем. С выхода генератора шума 1 сигнал поступает на три частотных фильтра 2, 3 и 6, два из которых (2 и 6) имеют фиксированную настройку, равную центральной частоте резонансной системы гетеродина. Резонансная частота фильтра 3 меняется в широких пределах. С выходов фильтров 2 и 3 сигналы поступают на умножитель 4, который совместно с фильтром нижних частот образует вычислитель взаимнокорреляционной функции выходных сигналов фильтров 2 и 3. Умножитель 7 совместно с фильтром нижних частот 8 образует вычислитель автокорреляционной функции выходного сигнала фильтра 6. Делитель 9 производит нормировку взаимнокорреляционной функции шумовых компонентов шума гетеродина. Результаты экспериментов, проведённых с использованием предложенной модели, приведены в таблице и на рис. 23, где построена зависимость корреляционной функции компонентов шума гетеродина от относительной расстройки по отношению к центральной частоте настройки его резонансной системы.

Как следует из таблицы и рис. 23, существенную корреляцию ($K_{корр} \geq 0,5$) имеют те шумовые компоненты напряжения гетеродина, которые отстоят от центральной частоты настройки не более чем на 1 %. Так как относительная полоса пропускания резонансной системы гетеродина составляет величину порядка $(\Delta f / f_0) \approx 0,01$, то в случае прямого преобразования частоты практически все составляющие спектра шума гетеродина, проникающие на выход преобразователя частоты, имеют высокий коэффициент корреляции друг с другом. В этом случае происходит практически полная компенсация этих компонентов шума, как и опорного напряжения гетеродина.

Таким образом, и общий уровень внутренних шумов, определяющий максимально достижимую чувствительность для любого радиоприёмного устройства, оказывается ниже в случае прямого преобразования частоты.

Таблица. Коэффициенты корреляции компонентов шума гетеродина

$\Delta f / f_0$	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	-0.01	-0.005	0
$K_{корр}$	0.005	0.0075	0.015	0.0315	0.125	0.3625	0.6975	1
$\Delta f / f_0$	0.005	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	–
$K_{корр}$	0.6975	0.3625	0.125	0.0315	0.015	0.0075	0.005	–

Представленные выше данные свидетельствуют о значительном повышении чувствительности как модуляционных, так и корреляционных радиометров в случае использования в них прямого преобразования частоты. По совокупности технических характеристик модуляционные радиометры получили наиболее широкое распространение в радиотеплолокаторах.

Помимо прямого преобразования частоты, для улучшения чувствительности приёмников модуляционных радиотеплолокаторов можно предложить дополнительное изменение способа обработки в них радиотеплового сигнала, заключающееся в следующем. Преобразователь с прямым преобразованием частоты использует лишь одну квадратурную компоненту антенного шума радиотеплолокатора, т.е. только половину его мощности. От указанного недостатка можно избавиться, если перед преобразователем с прямым преобразованием частоты произвести над сигналом операцию вычисления его абсолютного значения (модуля сигнала).

На рис. 24 приведены результаты имитационного моделирования работы модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты, в котором на выходе усилителя радиочастоты выполняется вычисление абсолютного значения (модуля) радиотеплового сигнала.

На приведённых графиках кривая 1 соответствует выходному напряжению радиометра (приёмника модуляционного радиотеплолокатора) при наличии на его входе радиотеплового сигнала величиной, составляющей 10 % от мощности внутреннего шума прибора. Выходное напряжение радиометра при увеличении мощности входного сигнала до 30 % от уровня внутреннего шума прибора представлено кривой 2 на рис. 24. Приведённые результаты моделирования свидетельствуют о том, что в случае предварительной нелинейной обработки радиотеплового сигнала чувствительность модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты улучшается приблизительно в 4 раза по сравнению с обычным модуляционным радиометром с прямым преобразованием частоты входного сигнала (для сравнения см. рис. 3).

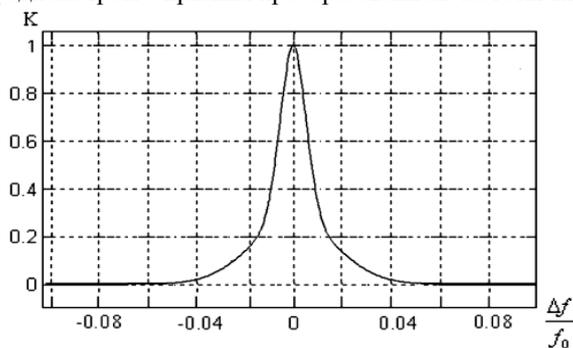


Рис. 23. Корреляционная функция компонентов шума гетеродина

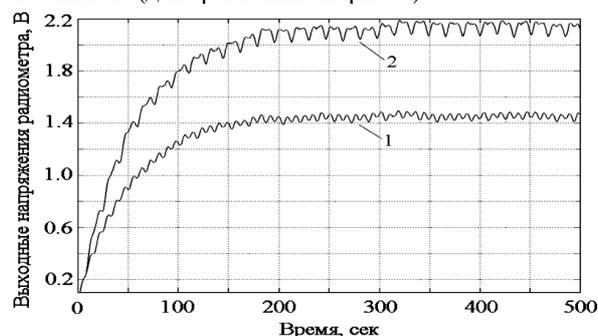


Рис. 24. Выходные сигналы модуляционного радиометра с прямым преобразованием частоты при использовании предварительной нелинейной обработки радиотеплового сигнала

4. Заключение

Радиотеплолокаторы по ряду параметров превосходят эксплуатационные характеристики современных судовых навигационных радиолокаторов. Уязвимым местом в использовании радиотеплолокатора является разрешающая способность устройства по дальности.

Применение в качестве антенной системы радиотеплолокатора фазированной антенной решётки приведёт к улучшению ряда эксплуатационных характеристик устройства: разрешающей способности по дальности, скорости обзора пространства, надёжности.

Использование на судах морского флота радиотеплолокаторов позволит серьёзно повысить безопасность мореплавания за счёт увеличения скорости обзора пространства и улучшения обнаружительной способности по сравнению с используемыми в настоящее время активными навигационными радиолокационными системами.

Улучшение технических характеристик радиотеплолокаторов позволит судоводителям более эффективно решать навигационные задачи.

Эффективным средством повышения чувствительности приёмников радиотеплолокаторов является применение прямого преобразования частоты.

Литература

Башаринов А.Е., Тучков Л.Т., Поляков В.М., Ананов В.И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений. М., Советское радио, с.153, 1968.

Караваяев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. М., Радио и связь, с.88, 1987.