

УДК 621.396.982

А.А. Федотов, А.М. Горев

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПЕЛЕНГАТОРОВ

Федотов Александр Алексеевич, доктор технических наук, доцент, окончил Даугавпилское высшее военное авиационное инженерное училище, факультет радиоэлектронного оборудования. Директор Дирекции «МФИ-М» ОАО «Концерн «Моринсис-Агат». Имеет монографию, главы специальной учебной литературы, статьи в журналах и сборниках по тематике радиолокационных устройств и систем, обработки сигналов, системотехники. [e-mail: mfi-m@concern-agat.ru].

Горев Алексей Михайлович, кандидат технических наук, окончил Таганрогский радиотехнический университет, факультет радиотехнических систем. Ведущий научный сотрудник сектора научно-технического центра ОАО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи». Имеет статьи в журналах и сборниках по тематике радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы. [e-mail: niis@pbox.ttn.ru].

Аннотация

Рассмотрены пути совершенствования широкополосных пеленгаторов в направлении повышения их помехозащищенности и чувствительности. Показана принципиальная возможность перевода их в режим цифрового диаграммообразования (ЦДО). Отмечены проблемы на пути перехода таких пеленгаторов на ЦДО.

Ключевые слова: широкополосные пеленгаторы, цифровое диаграммообразование, радиоэлектронные средства, антенные решетки.

Alexander Alexeevich Fedotov, Doctor of Engineering, Associate Professor, graduated from Daugavpils Higher Military Aviation Engineering School and the Faculty of Avionics Equipment; Director of 'MFI-M' Management of JSC 'Concern 'Morinformsystem-Agat'; author of monograph, chapters of professional study materials, articles in the field of radar and radar systems, signal processing, and system engineering. e-mail: mfi-m@concern-agat.ru.

Alexey Mikhailovich Gorev, Candidate of Engineering, graduated from Taganrog Radioengineering University and the Faculty of Radioengineering Systems; leading staff scientist of a department at the scientific and technical centre of Joint Stock Company 'Telecommunications Research and Development Institute'; author and contributor of articles in the field of Electronic Intelligence and Electronic Warfare. e-mail: niis@pbox.ttn.ru .

Abstract

The article deals with methods of interference immunity and sensitivity improvement of wide-band bearing finders. We disclose a possibility in principle to take them off into digital beam-forming mode. Problems of the digital beam-forming mode override of these bearing finders are noted.

Key words: wide-band bearing finders, digital beam-forming mode, radio electronic means, antenna arrays.

ВВЕДЕНИЕ

Современные зарубежные комплексы радиоэлектронной борьбы (РЭБ) имеют в своем составе аппаратуру пеленгования и аппаратуру активных помех. Они работают в широком диапазоне рабочих частот с использованием моноимпульсного способа определения параметров сигналов радиоэлектронных средств (РЭС). В последнее время для реализации моноимпульсного способа пеленгования сигналов РЭС и повышения точности вместо одиночных антенн используются многолучевые антенны и многолучевые антенные решетки (МАР) с большим числом каналов [1, 2]. Каждому каналу приемной МАР по выходу соответствует один луч. Упрощенные схемы приемной и передающей частей приведены на рисунках 1 и 2.

Предлагаемый способ построения широкополосных пеленгаторов

Для измерения частоты принимаемых сигналов используются антенна с широкой секторной диаграммой от 180° до 360° и широкополосные приемники прямого усиления с мгновенным измерением частоты (МИЧ). При этом достигаются высокие вероятности приема сигналов РЭС в широком секторе углов при любом варианте перестройки сигналов по частоте в диапазоне рабочих частот.

Используемые в настоящее время широкополосные МАР зарубежных приемных подсистем для формирования многолучевой структуры применяют СВЧ диаграммообразующие схемы (ДОС) на основе линз Ротмана. Такие линзы представляют собой две параллельные металлические

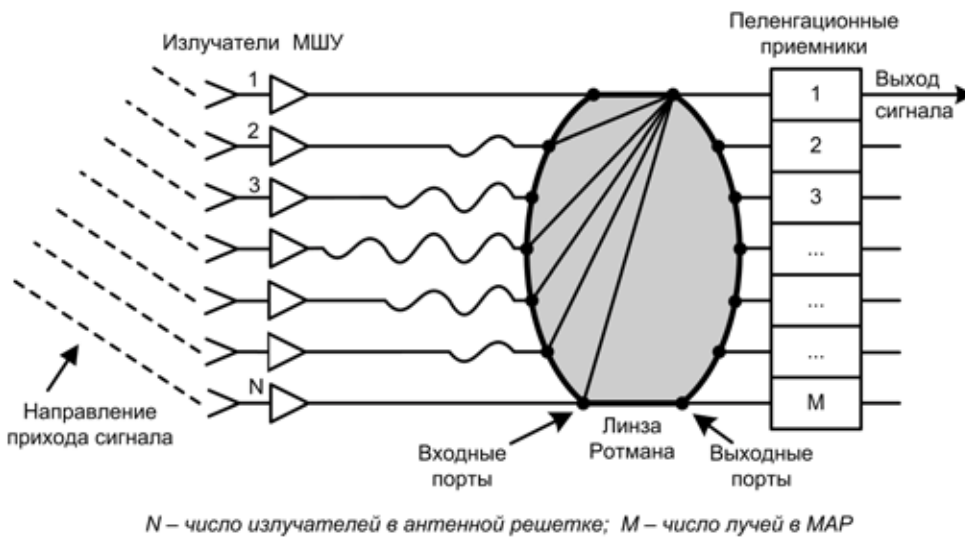


Рис. 1. Упрощенная схема построения приемной активной MAP

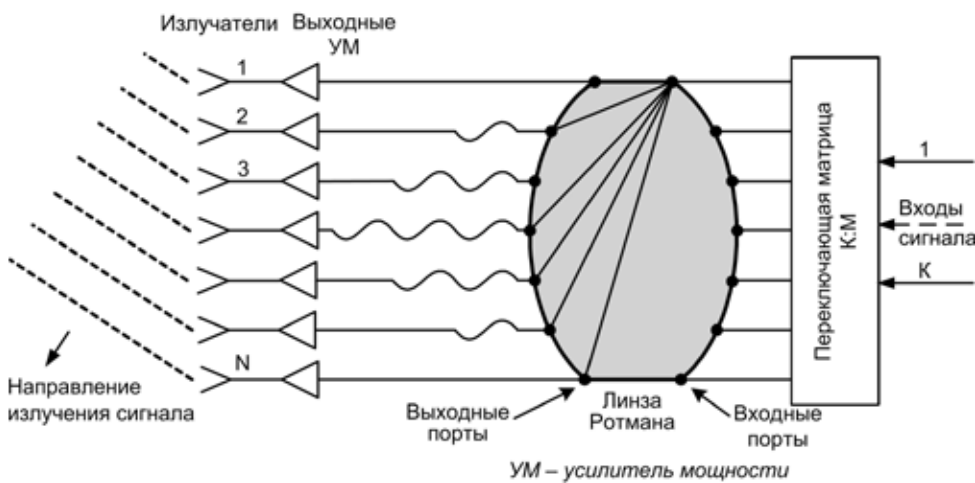


Рис. 2. Упрощенная схема построения передающей активной MAP

поверхности, разделенные слоем высокочастотного диэлектрика, подключенные к коаксиальным выводам, расположенным на двух противоположных сторонах.

Выводы вдоль одной стороны через СВЧ-кабели подсоединены к соответствующим излучателям решетки. Выводы на противоположной стороне расположены по фокальной дуге, так что каждый из них соответствует определенному направлению оси луча в пространстве. Форма линзы и длина кабелей являются основными параметрами, от которых зависит процесс формирования (фокусировки) луча. Все траектории лучей от данной фокальной точки до соответствующей точки фронта волны имеют одинаковую электрическую длину. Местоположение фокальных точек определяется исключительно конфигурацией ДОС, и, следовательно, направление отдельного луча не зависит от частоты.

Для повышения чувствительности на выходе каждого излучателя устанавливается малошумящий усилитель (МШУ). Это является важным условием, определяющим как электрические, так и конструктивные и массогабаритные характеристики системы в целом. В приемных решетках линзы фокусируют сигналы так, что возбуждаются лишь определенные выходы. Появление сигналов в каналах,

соответствующих этим выходам, позволяет определить направление прихода сигнала. При построении MAP по схеме рисунка 1 достигается высокая вероятность приема сигналов РЭС при любом варианте перестройки сигналов по частоте в диапазоне рабочих частот. Однако они имеют и ряд ограничений по электрическим и конструктивным параметрам и не в полной мере удовлетворяют требованиям работы в составе радиотехнических комплексов по уровню боковых лепестков, по ширине рабочего сектора, по решению задач электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости. В период работы своих корабельных РЭС, использующих непрерывное или квазинепрерывное излучение, а также при наличии в секторе работы радиотехнического обнаружения (РТО) источников умышленных помех эффективность такого пеленгатора и комплекса РЭВ в целом может снижаться практически до нуля.

Примером построения пеленгатора с использованием описанных линз с линейной решеткой является пеленгатор корабельной системы AN/SLQ-32 [1].

Известным способом исключения приема мешающих сигналов и сохранения эффективной работы аппаратуры РТО без потери возможности принимать импульсные сигналы РЭС противника мгновенно в диапазоне рабочих частот является использование в ней коммутируемых перестраиваемых режекторных фильтров (КПРФ). Однако применение КПРФ в многоканальных амплитудных пеленгаторах увеличивает погрешность пеленгования по причине дополнительной неидентичности коэффициентов передачи канальных фильтров, ухудшает чувствительность из-за дополнительных потерь, присущих КПРФ, а также усложняет конструкцию пеленгаторов из-за большого числа КПРФ.

Предложенное в работе [3] техническое решение устраняет указанные недостатки в части обеспечения ЭМС. Суть предложения заключается в следующем. КПРФ, настраиваемый на частоту мешающих сигналов, включают только в канал измерения частоты (КИЧ), а в приемных каналах пеленгатора на выходах линзы Ротмана (ДОС) вместо широкополосного приемника прямого усиления предложено использовать супергетеродинный приемник.

При этом в качестве гетеродинного сигнала используются сигналы, принятые КИЧ, сдвинутые на фиксированную частоту 160 МГц. В этом случае достигается повышение чувствительности каналов приема пеленгатора за счет более узкой полосы пропускания фильтров промежуточной частоты, а исключение приема мешающих сигналов в КИЧ автоматически приводит к отсутствию этих сигналов на выходах всех каналов пеленгатора, так как исключается сигнал гетеродина для смесителей приемных каналов пеленгатора. Вне полосы режекции обеспечивается прием сигналов в остальной части рабочего диапазона частот.

С помощью перестраиваемого режекторного фильтра можно обеспечить приемлемое функционирование аппаратуры РТО комплекса в случае изменения помеховой обстановки (например, с помощью выбрасываемого на парашюте имитатора помеховых сигналов или беспилотных летательных аппаратов в район нахождения носителя комплекса РЭБ).

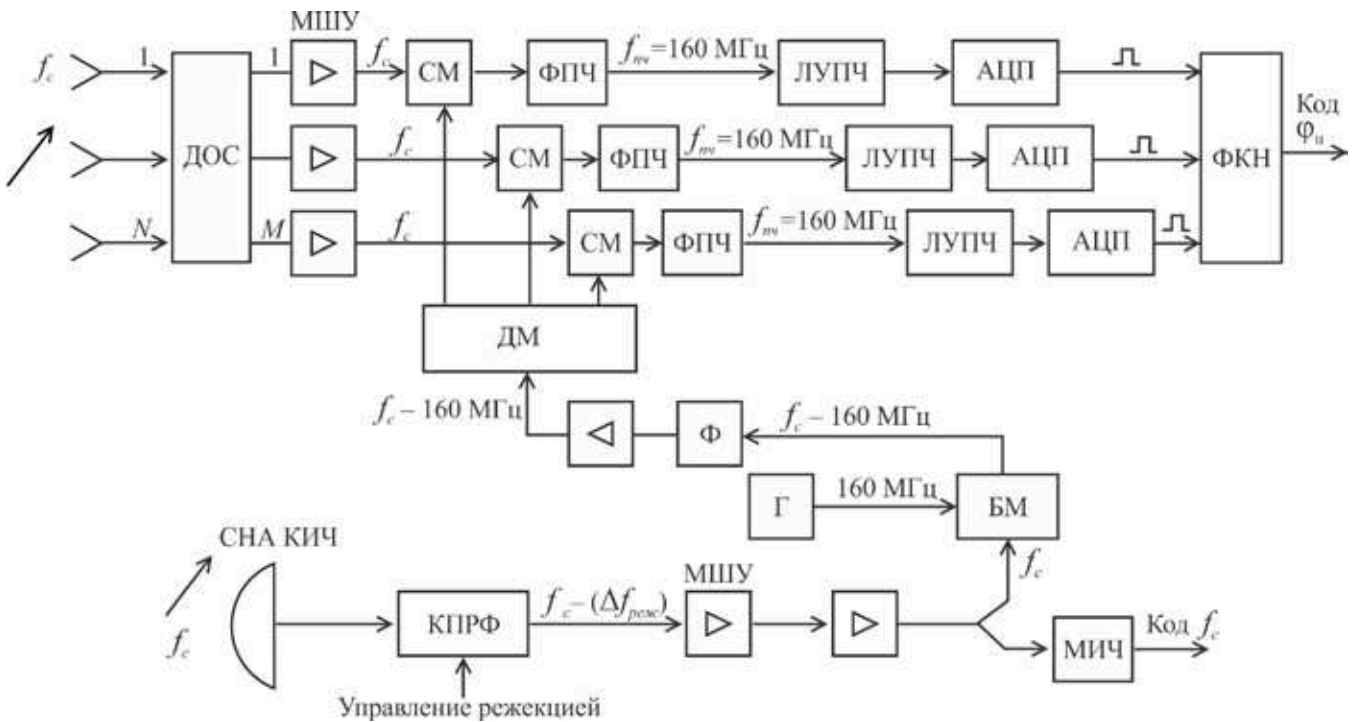
Упрощенная структурная схема построения аппаратуры РТО комплекса РЭБ в предлагаемом в [3] варианте приведена на рисунке 3. Принцип работы пеленгатора ясен из приведенной схемы.

Предложенный вариант пеленгатора, как и радиолокационной системы (РЛС), основан на преобразовании СВЧ-сигнала в область низких частот. Практическая реализация переноса спектра СВЧ-сигнала в область низких частот от 100 до 200 МГц позволяет использовать существующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) при внедрении способов ЦДО в комплексы РЭБ.

В этом случае схема построения приемной решетки с ЦДО может быть преобразована к виду, приведенному на рисунке 4.

В решетке с преобразованием частоты по схеме рисунка 4 может использоваться как непосредственная, так и квадратурная обработка сигналов на промежуточной частоте с соответствующим применением двух АЦП в каждом канале. Это позволит реализовать съем информации с АЦП с частотой, в два раза меньшей, чем при одноканальном построении.

Существует много вариантов схемного построения аппаратуры ЦДО, которые приводятся в соответствующей литературе. Из-за ограниченных возможностей в данной статье они не рассматриваются.



f_c – частота принимаемого сигнала;

f_{nc} – промежуточная частота;

N – число приемных излучателей;

M – число лучей;

МШУ – маломощный усилитель с ограничителем по входу;

СМ – смеситель;

ФПЧ – фильтр промежуточной частоты;

ЛУПЧ – логарифмический усилитель промежуточной частоты с видеовыходом;

ФКН – формирователь кода направления;

$\Phi_{ц}$ – пеленг цели;

ДМ – делитель мощности;

Φ – полосовой фильтр ($f_{nc} - f_{\theta}$);

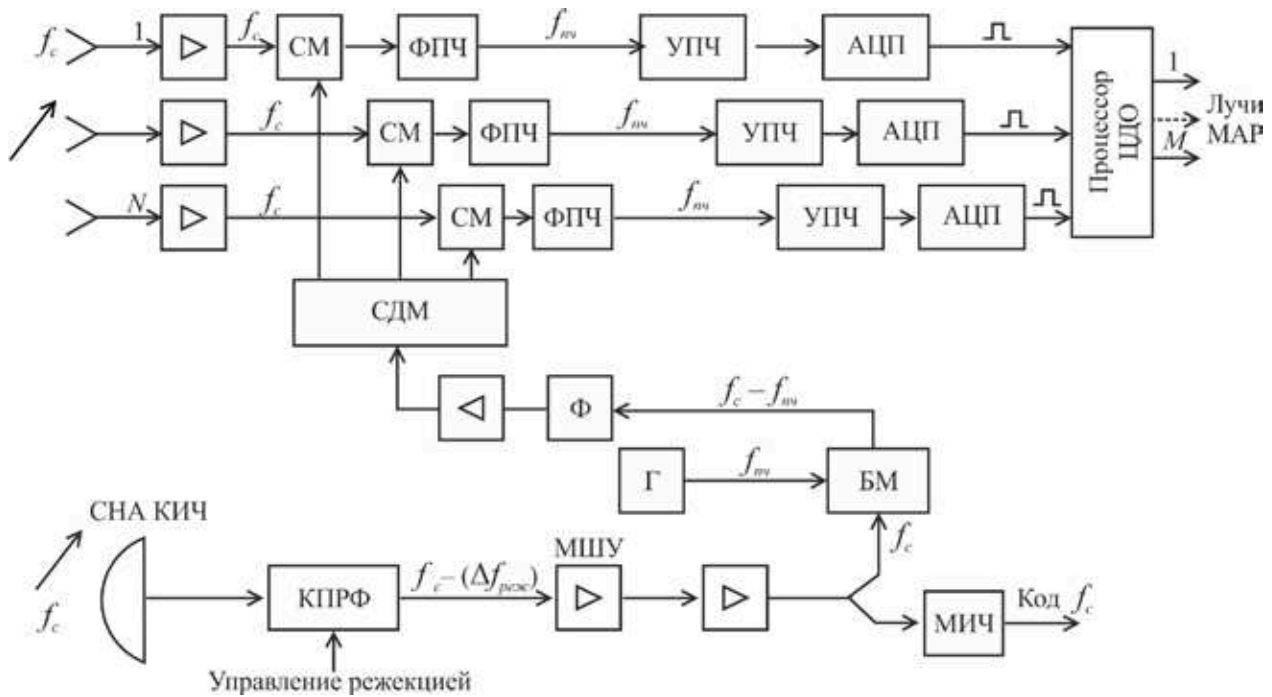
Γ – генератор промежуточной частоты;

БМ – балансный модулятор;

СНА-КИЧ – слабонаправленная антенна канала измерения частоты;

КПРФ – коммутируемый перестраиваемый режекторный фильтр

Рис. 3. Функциональная схема пеленгатора с преобразованием частоты



СДМ – синфазный делитель мощности;

УПЧ – усилитель промежуточной частоты

Рис. 4. Упрощенная схема построения пеленгатора с ЦДО

Учитывая достоинства способов ЦДО [4] и недостатки формирования диаграмм направленности (ДН) непосредственно на СВЧ, дальнейшее совершенствование широкополосных пеленгаторов для комплексов РЭБ следует искать на пути внедрения ЦДО. Подтверждением этому может служить все более широкое распространение цифровых антенных решеток (ЦАР) с ЦДО. Перспективность цифрового формирования ДН для радиолокационной техники была доказана теоретически и практически еще к началу 90-х годов XX века. Теперь эта технология становится основой множества новейших отечественных и зарубежных разработок ЦАР для систем самого различного назначения. Подтверждением этого факта могут служить, например, РЛС Нижегородского НИИРТ 55Ж6У и 1Л119 (Небо-СВУ), в которых цифровое формирование пространственных ДН осуществлено в метровом диапазоне волн. Успешное освоение длинноволновой части радиодиапазона связано с ограниченными возможностями АЦП по частоте. Подтверждением продвижения ЦДО РЛС в дециметровый и сантиметровый диапазоны волн с преобразованием СВЧ-сигналов в промежуточную частоту являются зарубежные РЛС S1850M D-диапазона (1-2 ГГц), SMART-S F-диапазона (3-4 ГГц), APAR X-диапазона (8-12,4 ГГц) [4].

В отличие от стран СНГ, где при разработке РЛС с ЦАР в силу объективных причин основные усилия направляются на создание систем наземного базирования, за рубежом такого рода проекты наиболее активно финансируют военно-морские ведомства [4]. Дело в том, что современные боевые части ВМС НАТО и США, как никогда прежде, нуждаются в радиолокационных системах, обладающих высокой производительностью, чувствительностью и помехозащищенностью. От боевых кораблей требуется спо-

собность к действию в любой части акватории земного шара, причем как в открытом море, так и в прибрежной зоне. Необходима постоянная готовность к противодействию интенсивным атакам комбинированных средств нападения (ракет, авиации, наземных ударных систем) в обстановке сложных активных помех и помеховых отражений от берега и морских волн. Поэтому стремление к широкомасштабному внедрению технологии цифрового формирования луча как при приеме, так и при излучении вполне объяснимо. Новые подходы к диаграммообразованию в РЛС в сочетании с полномерной цифровой обработкой сигналов обеспечивают целый ряд преимуществ [4].

При выполнении приемно-передающих модулей ЦАР с программно-конфигурируемой архитектурой в полной мере может быть реализован принцип интегрированной апертуры. В это понятие входит объединение антенных систем и СВЧ-блоков всех типов бортовых радиотехнических средств в единую структуру с минимизацией единиц аппаратуры, а также побочных радиоизлучений на борту боевых средств. Согласно заявлениям [4], речь идет о правомерности интеграции систем радиолокации, радиотехнической разведки (РТР) и радиопротиводействия (РЭП). При этом достигается оперативная функционально ресурсная адаптация архитектуры бортового радиоэлектронного оборудования и существенно возрастает эффективность всего радиоэлектронного комплекса. Однако, судя по публикациям, сведения о реализации способов ЦДО для комплексов РТО и РЭП отсутствуют.

Следует обратить внимание на ряд важных обстоятельств, сдерживающих продвижение принципов ЦДО в область более высоких частот и возможность их использования в технике РЭБ. В работе [5] отмечено, что для обычной обзорной РЛС необходимо быстрое действие

процессора, близкое к триллиону операций в секунду. Очевидно, что реализация таких процессоров является проблематичной. При переходе к алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ) число операций может быть значительно снижено. В то же время алгоритм БПФ требует также существенного увеличения объема памяти запоминающего устройства. Как правило, РЛС использует супергетеродинный приемник, то есть требуется большое число синфазных каналов одного или двух гетеродинов. Известно [5], что для восстановления сигнала число выборок должно быть не менее $2\Delta f$ в секунду, то есть возможности АЦП определяют полосу частот сигнала.

Наряду с отмеченными достоинствами, ЦАР имеют недостатки, препятствующие их продвижению в область более высоких частот для РЛС и исключающие их использование при создании широкополосных систем РЭБ. В первую очередь, это сложность системы, состоящей из сотен модулей АЦП и многопроцессорного вычислительного устройства, к которому предъявляются очень высокие требования по быстродействию. Большой проблемой является синфазная разводка по множеству дополнительных каналов со смесителями для сигналов СВЧ гетеродинов и синхронизации при весьма жестких требованиях к одновременности их прихода ко всем модулям ЦАР. Имеются также ограничения по ширине полосы частот обрабатываемого сигнала, связанные с быстродействием АЦП, применяемого в модуле. Кроме того, важно отметить, что чувствительность приемных ЦАР по полю ниже, чем у сфазированных (сфокусированных) антенных решеток или МАР с формированием ДН на СВЧ или радиочастоте. Это объясняется тем, что аналоговые сигналы от излучателей решетки не суммируются на радиочастоте, а поступают поканально непосредственно на входы АЦП, с выходов которых в цифровом виде (видеосигналы) поступают в процессор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что в ближайшей перспективе внедрение ЦАР с ЦДО в широкополосные системы РЭБ в диапазонах от дециметрового до сантиметрового может осуществляться также только с преобразованием частоты и использованием балансных модуляторов для следящего гетеродина,

аналогичных приведенным в работе [6]. Согласно [6], модулятор обеспечивает работу в диапазоне частот от 6 до 18 ГГц со смещением частоты на 100–200 МГц с подавлением сигналов на несущей и побочных частотах не менее 20 дБ.

Для реализации ЦДО в широкополосных многолучевых пеленгаторах аппаратуры РЭП необходимо решение ряда проблем, которые отсутствуют при создании РЛС с ЦДО, а именно:

- создание КИЧ, формирующего сигнал следящего гетеродина в широкой полосе частот (1–2 октавы) с достаточным соотношением сигнал/шум и достаточным уровнем для срабатывания балансного модулятора;
- разработка широкополосных балансных смесителей (1-2 октавы) для переноса спектра принимаемого сигнала на фиксированную промежуточную частоту;
- обеспечение синфазности СВЧ-сигналов гетеродина, подаваемых на смесители СМ;
- обеспечение минимальных (одинаковых) задержек времени прохождения принимаемых сигналов и сигнала гетеродина по цепям аппаратуры к смесителям по каждому импульсу;
- разработка эффективных КПРФ с малым ослаблением сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. AN/SLQ-32 Electronic Warfare (EW) system фирмы Raytheon.
2. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. – М. : Вузовская книга. – 2003. – с. 527.
3. Willian B. Sullian. Interference Supression Circuit and Method thereof for multi-channal Receivers // Патент США № 6727840 от 27.04.2004.
4. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки - будущее радиолокации // Военная электроника. Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2001. – № 3. – С. 42–46.
5. Проблемы антенной техники / под ред. чл.-кор. АН СССР Л.Д. Бахраха и проф. Д.И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1989. – 389 с.
6. 6 to 18 GHz single-sideband upconverter. – URL: www.miteq.com.