

УДК 621.396.62

А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, А.В. Смоляков

Проектирование широкополосного приемника матрично-параллельного типа для радиотехнического мониторинга и радиотехнической разведки

Обоснована структурная схема широкополосного приемника матрично-параллельного типа для применения в средствах радиотехнического мониторинга и разведки. Описано функционирование схемы. Выявлены и формализованы характерные закономерности в соотношении рабочих и промежуточных частот. Предложена методика проектирования приемника с учетом технических особенностей схемы. Представлен пример расчета приемника по предложенной методике с использованием современных программных средств.

Ключевые слова: матрично-параллельный приемник, матричный приемник, радиотехнический мониторинг, радиотехническая разведка, методика проектирования приемника, широкополосный приемник, частотный план.
doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-105-113

Радиотехнический мониторинг (РТМ) проводится в широком диапазоне частот с целью контроля функционирования радиотехнических и телекоммуникационных источников радиоионизации (ИРИ), анализа электромагнитной обстановки и обеспечения электромагнитной совместимости ИРИ [1–4].

Задачей радиотехнической разведки (РТР) является получение сведений о пространственно-временных параметрах сигналов, на основе которых определяется назначение, тип и местоположение ИРИ. Для этого как в военное, так и в мирное время также выполняется анализ радиодиапазона [5–8].

Обоснование требований к приемнику

Помимо очевидных требований к приемнику РТР и РТМ, таких как высокая чувствительность, широкая мгновенная полоса рабочих частот (РЧ), исключение пропуска сигналов, потери короткого импульса до обработки и переднего фронта длинного импульса, необходимо обратить внимание на удовлетворение других требований.

Так, без принятия специальных мер с высокой вероятностью в широкополосном приемном устройстве (ШПрУ) возможно возникновение неоднозначности определения частоты (НОЧ) различного рода [9]. НОЧ возникает ввиду наличия паразитных полос пропускания в СВЧ-трактах приемной аппаратуры, вследствие чего образуются побочные каналы приема (НОЧ-1). Малая крутизна АЧХ канальных фильтров при попадании сильных сигналов в смежные области соседних каналов также приводит к НОЧ (НОЧ-2). Постоянно растущее количество одновременно работающих ИРИ повышает вероятность совмещения сигналов по времени, что при переносе широкой полосы РЧ в узкую полосу промежуточных частот (ПЧ) также приводит к НОЧ (НОЧ-3). При приеме широкополосным приемником мощных сигналов в нелинейных элементах СВЧ-тракта возможно возникновение гармоник сигнала, попадающих в полосу РЧ (НОЧ-4) [10].

Применение современными РЛС широкополосных сигналов (ШПС) [11, 12] требует использования широкой полосы обработки. Соответственно анало-

говая часть приемника должна иметь широкую полосу пропускания, подаваемую на обработку.

Обоснование технических решений, улучшающих показатели ШПрУ

За основу предлагаемого приемника взята матричная схема, имеющая широкую мгновенную полосу РЧ без пропуска сигналов при приемлемых массогабаритных характеристиках [5, 6].

Повышение чувствительности приемника приблизительно на $10\lg(2N)$ дБ (где N – количество каналов приемника) достигается запирающим частотных каналов в отсутствие сигнала. При превышении сигналом заданного порога канал открывается, и сигнал поступает в устройство цифровой обработки. Такое решение реализовано в средствах РТР, предназначенных для работы в поисковом по частоте и беспойском режимах работы [13].

Снижение НОЧ-1 обеспечивается установкой обнаружителя в тракт ПЧ, что, в отличие от варианта его установки в тракт ВЧ, исключает ложное обнаружение при попадании сигнала в паразитные полосы частотных каналов ШПрУ. Возможность попадания в паразитную полосу фильтра ПЧ исключается подавлением паразитных полос фильтра ПЧ путем использования режекторных фильтров.

Уменьшение величины НОЧ-2 целесообразно выполнить путем разделения каналов на группы. В работе [14] показано, что при этом в типовом приемнике РТР (РТМ) полоса неоднозначности сужается менее чем до 100 кГц.

Для снижения НОЧ-3 предлагается использовать рассмотренное в работе [9] устройство измерения частоты.

Более подробный анализ эффективности различных способов снижения НОЧ представлен в работе [9].

Другой задачей является снижение уровня вызванных работой гетеродинов внутрисистемных помех. Уменьшить помехи можно путем использования резистивных смесителей с субгармонической накачкой (ССГН) [15]. При этом частоты гетеродинов не попадают в диапазон рабочих частот (ДРЧ)

ШПрУ. Основные характеристики и краткий сравнительный анализ смесителей, работающих на второй гармонике, представлены в работах [16, 17], рекомендации по проектированию даны в [18].

В целях упрощения схемно-конструктивного построения приемного устройства предлагается одновременное использование двух известных технических решений. Первое – работа одного гетеродина на два смесителя [19]. Второе – уменьшение количества каналов ВЧ и гетеродинов за счет дополнительного разбиения на каналы в диапазоне ПЧ [20].

Прием и обработка импульсов длительностью десятки – сотни наносекунд затрудняется конечным временем срабатывания обнаружителя. Поэтому для обработки коротких импульсов (а также исключения потери фронта длинного импульса) в обнаружитель введена линия задержки. Величина задержки подбирается равной времени срабатывания обнаружителя и отпираания канала [21].

Для обработки широкополосных сигналов необходимо использовать на выходе широкую полосу обработки. В целях унификации аналоговая часть приемника должна быть сопрягаемой с типовыми модулями цифровой обработки (МЦО). Рабочая полоса таких модулей, в зависимости от конкретного исполнения, достигает до 6 ГГц [22].

Известны успехи в области создания средств функционального поражения (ФП) с рабочим диапазоном частот от 0,5 до 100 ГГц и импульсной мощностью до 5 ГВт [23]. Тактика применения такого вида вооружения подразумевает использование на дальности до 2 км. Однако следует принимать во внимание, что оружие может быть приведено в действие и на большей дальности. Так, при типовой дальности обнаружения воздушных ИРИ средствами РТР (РТМ), равной 400 км, мощности СВЧ-излучения 5 ГВт и коэффициентах усиления передающей и приемной антенн 30 дБ согласно выражению [24]

$$P_{\text{пр.вх}} = \frac{P_{\text{п}} G_{\text{п}}}{4\pi R_{\text{п}}^2} \frac{G_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi} 10^{-0,1kR_{\text{п}}} g_{\text{пс}}^2 \gamma$$

мощность сигнала $P_{\text{пр.вх}}$ на входе приемника РТР может достигать 27,5 дБм ($P_{\text{пр.вх}}$ – мощность сигнала на входе приемника РТР; $P_{\text{п}}$ – мощность источника излучения; $G_{\text{п}}$ – коэффициент усиления антенны средства ФП; $R_{\text{п}}$ – расстояние между средствами ФП и РТР; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны средства РТР (РТМ); λ – длина волны излучения; k – удельное затухание радиоволн в атмосфере; $g_{\text{пс}}^2$ – множитель, учитывающий влияние подстилающей поверхности (0...4); γ – коэффициент, учитывающий потери из-за различия поляризационных характеристик антенн средств ФП и РТР (РТМ)).

Максимальная входная мощность малошумящего усилителя (МШУ) на входе приемника в среднем составляет от 13 до 20 дБм [25]. При сокращении

расстояния между средствами РТР (РТМ) и ФП мощность сигнала на входе приемника РТР (РТМ) значительно превышает максимально допустимую. В связи с этим целесообразно использование защитных устройств, исключающих превышение максимально допустимой входной мощности.

На основе сравнительного анализа таких устройств, представленного в [26], при применении противником средств ФП на больших расстояниях (сравнимых с дальностью обнаружения) для диапазона до 18 ГГц могут использоваться устройства на основе арсенида галлия. При мощности сигнала на входе 1 Вт мощность просачивания составляет не более 13,5 дБм. Вносимые потери в заданном ДРЧ не превышают 2 дБ. На малых дистанциях для предотвращения выхода аппаратуры из строя необходимо применение более эффективных средств защиты.

Разработка структуры и описание работы ШПрУ

Описанные технические решения объединены в рамках обобщенной схемы приемника матрично-параллельного типа, изображенной на рис. 1. Приемник назван матрично-параллельным в том смысле, что за основу взята матричная схема, выход которой разделен на группы параллельно включенных каналов, на выходе каждой из которых сигнал может быть обработан отдельно.

Приемник (рис. 1) состоит из усилителя радиочастоты (УРЧ) на входе, ступени матричного приемника, G -канального устройства обработки сигнала ПЧ (УОС), устройства управления, устройства измерения частоты (УИЧ) и опорного генератора (ОГ). На схеме условно не показаны усилители.

Для описания работы схемы рассмотрим вариант реализации с двухканальным УОС ($G=2$) (рис. 2). Количество выходов ПЧ также равно двум, а многоканальное устройство обнаружения (МУО) становится двухканальным (ДУО). Соответствующий схеме частотный план представлен на рис. 3.

Входной сигнал в диапазоне рабочих частот от $f_{\text{н}}$ до $f_{\text{в}}$ поступает на вход УРЧ. После усиления часть сигнала ответвляется на УИЧ, а другая часть поступает непосредственно в приемник.

В приемнике сигнал делится по мощности разветвителем на $N/2$ частей, каждая из которых поступает на соответствующий вход двухканального преобразователя частоты (ДПРЧ). В ДПРЧ-сигнал делится пополам и направляется в каналы ДПРЧ, причем один канал настроен на нижнюю, а второй – на верхнюю боковую полосу преобразователя. Частотный диапазон каждого канала шириной Δf_1 задается входным полосовым фильтром. Диапазон первого канала ДПРЧ-1 обозначен Δf_1 , второго канала ДПРЧ-1 – $\Delta f_{(N/2+1)}$, первого канала ДПРЧ-2 – Δf_2 , второго канала ДПРЧ-2 – $\Delta f_{(N/2+2)}$ и т.д. В последнем ДПРЧ $N/2$ имеем диапазоны $\Delta f_{N/2}$ и Δf_N . Относительно нижней границы ДРЧ $f_{\text{н}}$ диапазоны частот можно описать следующим образом:

$$\Delta f_1 = f_H \dots (f_H + \Delta f);$$

$$\Delta f_2 = (f_H + \Delta f) \dots (f_H + 2\Delta f);$$

$$\dots$$

$$\Delta f_N = [f_H + (N - 1)\Delta f] \dots (f_H + N\Delta f).$$

Таким образом, $N/2$ низкочастотных каналов формируются первыми (верхними по схеме) каналами ДПРЧ, а $N/2$ высокочастотных каналов – вторыми (нижними по схеме) каналами ДПРЧ.

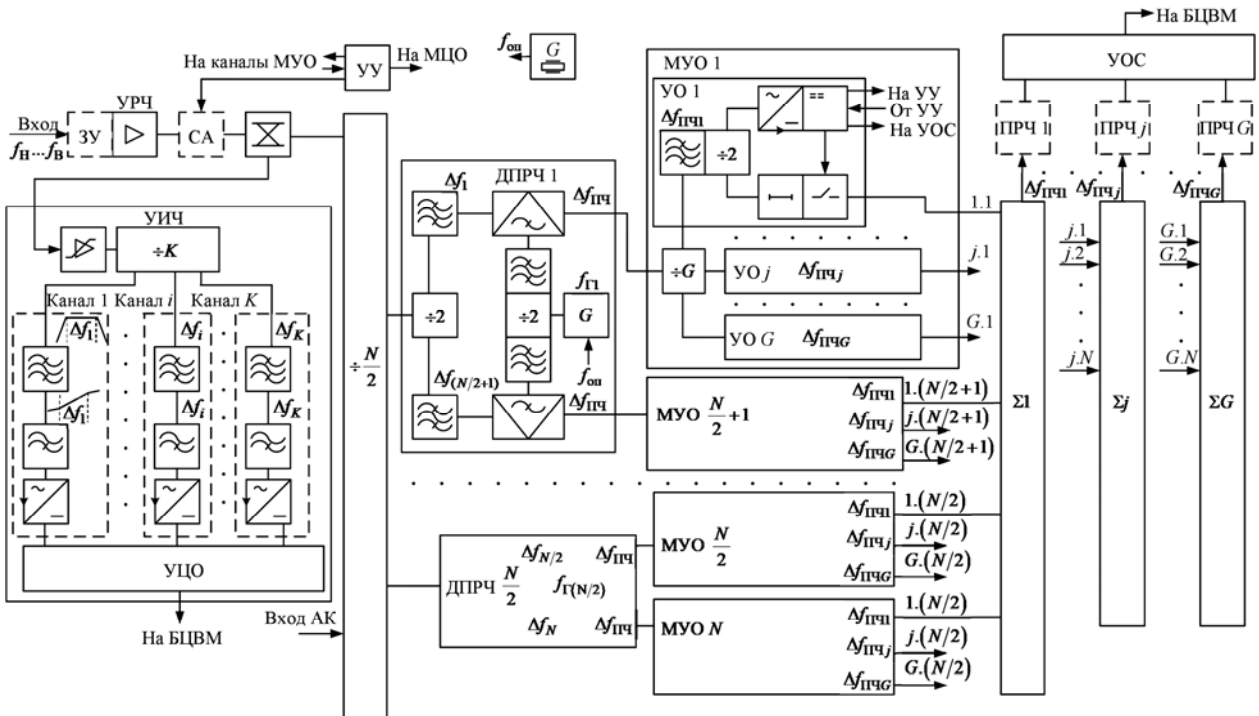


Рис. 1. Обобщенная структурная схема приемного устройства матрично-параллельного типа с устройством обработки сигнала ПЧ

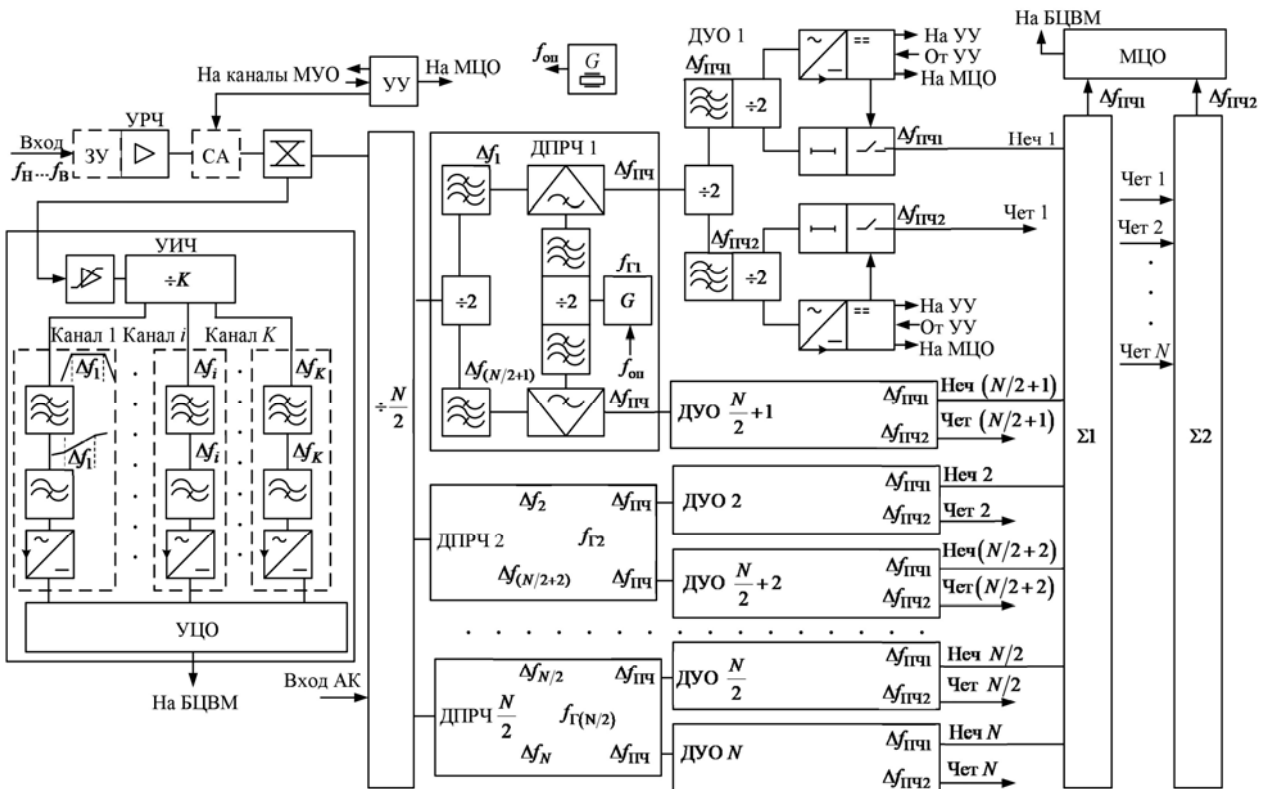


Рис. 2. Структурная схема приемного устройства матрично-параллельного типа с разделением на две группы каналов и модулем цифровой обработки сигнала ПЧ

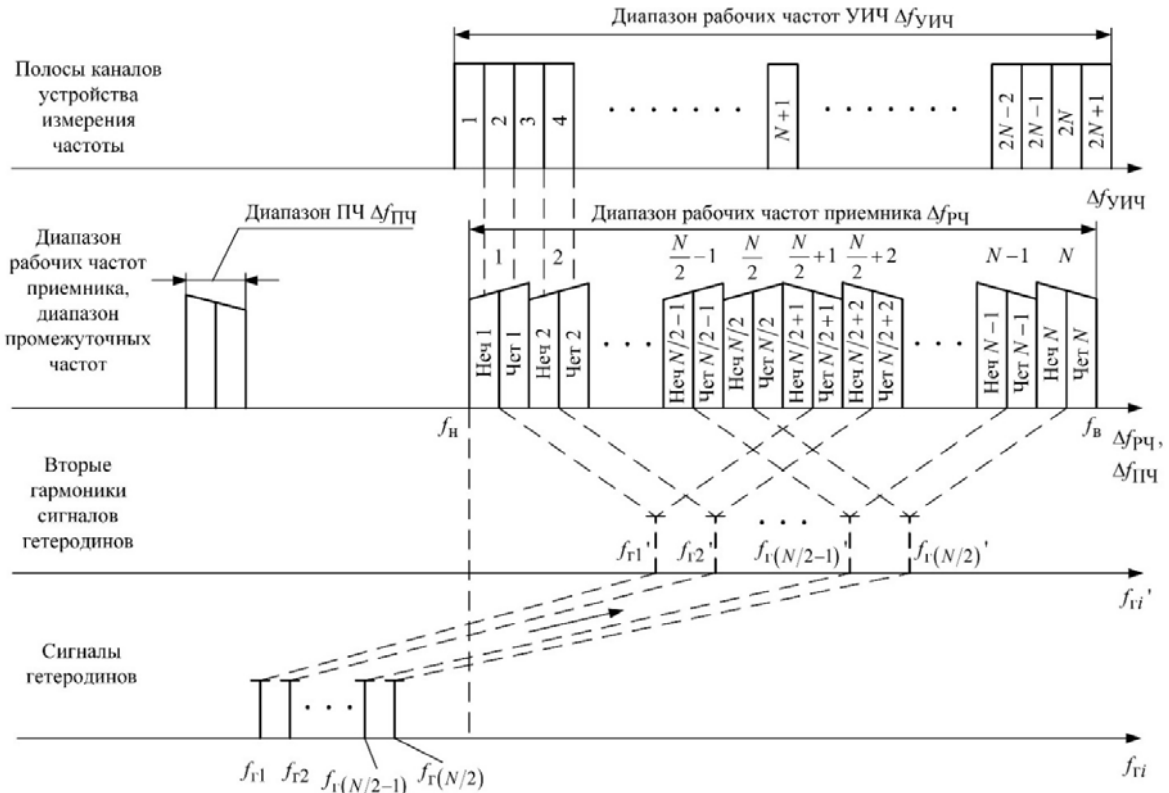


Рис. 3. Частотный план приемного устройства матрично-параллельного типа

После фильтрации в ДПРЧ-сигнал поступает на смеситель, которым переносится в диапазон промежуточных частот $\Delta f_{ПЧ}$. С каждого гетеродина сигнал $f_{Гi}$ поступает на два смесителя. Частоты $f_{Гi}$ выбраны так, что после преобразования сигналы на выходах всех ДПРЧ занимают одну и ту же полосу частот $\Delta f_{ПЧ}$. Спектры сигналов, попадающих в верхнюю половину ДРЧ-приемника, инвертируются (см. рис. 3), что учитывается при обработке.

Фильтры на выходах гетеродина настроены на частоту его сигнала и предназначены для развязки каналов ДРПЧ.

Мощность гетеродинов устанавливается из условия по крайней мере десятикратного превышения мощности сигнала, находящегося на верхней границе динамического диапазона (ДД) [27, 28]. Нижнюю границу ДД приемника определяет мощность помех, проникающих в преобразованный сигнал. Поэтому необходимое снижение гетеродинных помех достигается использованием резистивных ССГН. При этом сигналы гетеродинов выведены в область частот, расположенную ниже нижней рабочей частоты приемника: $\Delta f_{Гi} < f_{Гi}$ ($i = \overline{1, N}$), а смесители работают на второй гармонике этих частот (см. рис. 3). Частоты гетеродинов выбраны за пределами общей полосы ПЧ. Частотный план широкополосного приемного устройства описывается системой:

$$\begin{cases} f_{ПЧ} = \pm(f_{ck} - 2f_{Гi}); \\ 0 \leq f_{ПЧ} < f_{Гi} < f_{Гi} \end{cases} \quad (1)$$

где $f_{ПЧ}$ – промежуточная частота, f_{ck} – частота входного сигнала, обрабатываемого в k -м канале ДПРЧ ($k = \overline{1, N}$), $f_{Гi}$ – частота гетеродина i -го ДПРЧ ($i = \overline{1, N/2}$) $f_{Гi}$ – нижняя граница ДРЧ.

Все ДПРЧ выполнены по одинаковой схеме и различаются лишь частотными диапазонами обрабатываемого сигнала и, соответственно, рабочими частотами гетеродинов и полосовых фильтров. Выходами ДПРЧ являются выходы смесителей.

С выходов ДПРЧ-сигнал поступает на входы соответствующих ДУО. В ДУО сигнал разделяется пополам и поступает в каналы ПЧ, в которых выполняется обнаружение. На входах каналов ПЧ для обработки выделяются полосы $\Delta f_{ПЧ1}$ и $\Delta f_{ПЧ2}$. Разбиение диапазона ПЧ позволяет уменьшить полосу, подаваемую на цифровую обработку сигнала, при сохранении количества каналов СВЧ.

В отсутствие сигнала каналы ДУО закрыты. При попадании сигнала в канал ДУО, часть его с помощью делителя ответвляется на детектор. Продетектированный сигнал поступает на компаратор, где сравнивается с порогом h , задаваемым устройством управления. Вторая часть ответвленного делителем сигнала поступает через линию задержки на управляемый ключ. При превышении продетектированным сигналом заданного порога h компаратором открывается ключ, после чего сигнал через линию задержки и ключ поступает на выход ДУО, а компаратор формирует признак наличия сигнала и подает его на УУ.

Для исключения НОЧ-2 сигналы нечетных и четных каналов в полосах $\Delta f_{\text{пч1}}$ и $\Delta f_{\text{пч2}}$ суммируются на выходах отдельно.

С выходов сумматоров сигналы поступают в устройство обработки сигналов (УОС). Туда же передаются и номера сработавших каналов. С выхода УОС информация об обнаруженном сигнале направляется в бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ).

Помимо основной схемы, в приемнике использовано УИЧ. В нем сигнал проходит через усилитель-ограничитель (УО) и делитель мощности на K частей. Каждая часть поступает в один из каналов, отличающихся частотным исполнением. В каждом канале входным фильтром сигнал селектируется по частоте и попадает в частотно-зависимое устройство (ЧЗУ). После ЧЗУ амплитуда сигнала пропорциональна частоте. После ЧЗУ сигнал детектируется и поступает на выход канала, а далее – в устройство цифровой обработки (УЦО). УЦО оцифровывает сигнал, измеряет его амплитуду и сравнивает с заданными в памяти значениями. При совпадении с одним из них УЦО определяет частоту сигнала. С выхода УИЧ-код частоты передается на БЦВМ. После обработки определенных обнаружителями частот и данных УИЧ частоты принятых сигналов уточняются, в результате чего снижается НОЧ-3.

Ступенчатый аттенюатор (СА) используется в приемнике при необходимости расширения ДД.

Перечисленные решения имеют ограничение по реализации широкополосных СВЧ-устройств в нижней части ДРЧ. При расширении ДРЧ в область нижних частот с одновременным сохранением ширины канала обработки ширина полосы ПЧ остается фиксированной. При этом относительная полоса пропускания канальных фильтров расширяется, что затрудняет формирование крутых скатов АЧХ фильтра при сохранении низкой неравномерности характеристики в полосе пропускания. Аналогично усложняется реализация смесителей и других узкополосных устройств. Данное ограничение необходимо учитывать при выборе ширины каналов обработки.

Описание закономерностей на частотном плане

Анализ частотных планов матрично-параллельного приемника позволил определить оптимальную ширину полосы рабочих частот (РЧ) принимаемого сигнала для заданного диапазона промежуточных частот (ПЧ):

$$\Delta f_{\text{рч}} = 2(2f_{\text{пчн}} + \Delta f_{\text{пч}}), \quad (2)$$

где $\Delta f_{\text{пч}} = f_{\text{пчв}} - f_{\text{пчн}}$, $f_{\text{пчн}}$, $f_{\text{пчв}}$ – нижняя и верхняя границы диапазона ПЧ.

Так как $\Delta f_{\text{пч}} = f_{\text{пчв}} - f_{\text{пчн}}$, выражение (2) можно представить в другом виде:

$$\Delta f_{\text{рч}} = 2(f_{\text{пчн}} + f_{\text{пчв}}). \quad (3)$$

Выражение (3) свидетельствует о невозможности реализации широкой полосы для ДРЧ, лежащего в области единиц гигагерц, и ограниченной возмож-

ности расширения ДРЧ при заданном диапазоне ПЧ (ДПЧ) и частотах гетеродинов.

Также согласно выражению (3) при значительном ДРЧ требуется двойное преобразование частоты. Например, при полосе РЧ 20 ГГц потребуются $(2f_{\text{пчн}} + \Delta f_{\text{пч}})$ ГГц. Если задаться $\Delta f_{\text{пч}} = 1$ ГГц, то $f_{\text{пчн}} = 4,5$ ГГц, $f_{\text{пчв}} = 5,5$ ГГц. Таким образом, очевидно, что при современном уровне развития электронной компонентной базы требуется второе понижение частоты.

Полученные закономерности также показывают, что при проектировании приемника, исходя из заданной полосы ПЧ, существует оптимальная полоса РЧ, уже и шире которой предложенная структура ШПрУ нереализуема. Поэтому расчет целесообразно вести, исходя из заданной полосы РЧ, а полученный в результате ДПЧ, при необходимости согласовывать с диапазоном рабочих частот УОС с помощью преобразователей частоты.

Еще одной особенностью матрично-параллельного приемника является возможность расширения ДРЧ за счет параллельного включения нескольких схем. Если при этом частоты гетеродинов не попадают в ДРЧ ни первого, ни второго приемника, то их можно поместить в один корпус и рассматривать как одно ШПрУ. При необходимости один из приемников может иметь узкополосные каналы для увеличения чувствительности или повышения точности определения частоты.

Методика проектирования матрично-параллельного приемника

Методика проектирования предлагаемого ШПрУ матрично-параллельного типа основана на существующих методиках и соображениях, изложенных, например, в [28–31].

Исходными данными для расчета являются:

- ширина полосы рабочих частот $\Delta f_{\text{рч}}$;
- диапазон рабочих температур;
- количество различаемых сигналов, различных по частоте и совмещенных по времени;
- количество обрабатываемых сигналов, различных по частоте и совмещенных по времени;
- технология обработки сигнала ПЧ (при необходимости);
- доступные и целесообразные типовые модули УОС, реализующие выбранную технологию обработки;
- полоса входных сигналов УОС $\Delta f_{\text{уос}}$;
- ДД входного сигнала;
- отношение сигнал/шум q на выходе ПЧ.

Методика проектирования включает в себя следующие основные этапы:

1. Выбор типа УОС и количества каналов обработки.

Учитывая необходимую глубину и точность обработки, выбирается тип УОС. УОС может быть цифровым или для повышения чувствительности может быть использовано сжатие сигнала посредством дисперсионной линии задержки [32, 23]. В том случае, если достаточно лишь факта наличия сигнала

ла, УОС обрабатывает сигналы с выходов обнаружителей.

Исходя из требуемого количества одновременно обрабатываемых сигналов, определяется количество каналов обработки УОС G . Количеству каналов обработки УОС G соответствует количество каналов в каждом МУО.

2. Выбор диапазона промежуточных частот.

Исходя из заданной ширины ДРЧ $\Delta f_{рч}$, необходимой мгновенной полосы обработки сигнала и рабочих частот имеющихся стандартных устройств обработки по выражению (3) выбирается полный ДПЧ $\Delta f_{пч}$.

3. Определение количества и граничных частот каналов с преобразованием частоты и каналов ПЧ.

Определяется количество каналов с преобразованием частоты $N = \Delta f_{рч} / \Delta f_{пч}$, которое должно быть четным. Если условие не выполняется, необходимо изменить данные в п. 2.

По значениям $\Delta f_{рч}$ и N находятся граничные частоты каналов. Определяется общее количество каналов ПЧ, равное NG .

4. Определение параметров гетеродинов.

Частоты гетеродинов рассчитываются по выражениям (1). Учитывая динамический диапазон входного сигнала, рассчитывается мощность гетеродинов, которая в зависимости от типа смесителя должна превышать мощность сигнала не менее чем в 10–15 раз [16–18, 33]. Целесообразно уточнение мощности по результатам программного или физического моделирования.

5. Определение параметров канальных фильтров.

Исходя из требуемого ДД входного сигнала, определяется необходимая величина затухания АЧХ канальных фильтров в полосах зеркальных каналов. Рассчитывается порядок фильтров.

Полагая, что частоты основного и зеркального каналов достаточно удалены друг от друга, в предварительных расчетах можно определить ослабление зеркального канала по приближенной формуле [34]

$$\sigma_{зк} = \left(\frac{4\Delta f_{пч} Q}{f_0} \right)^n, \quad (4)$$

где Q – эквивалентная добротность фильтра, n – порядок фильтра, f_0 – центральная частота полосы пропускания.

6. Определение количества каналов устройства измерения частоты.

В соответствии с требуемым количеством различаемых (но не обрабатываемых) совмещенных во времени разночастотных сигналов определяется количество каналов УИЧ. Для получения разрешающей способности до одного сигнала в полосе $\Delta f_{пч} / 2G$ количество каналов УИЧ должно быть $K = GN + 1$. Максимальное количество одновременно различаемых сигналов при указанном условии равно GN .

7. Выбор усилительных и преобразовательных узлов.

Если проектируемое ШПрУ должно принимать сигнал в широком ДД, важным требованием является величина ДД самого МШУ. В данном случае ДД будет определяться не только уровнем собственных шумов и максимальной предельно допустимой мощностью входного сигнала, но и уровнем второй гармоники, возникающей при мощном входном сигнале. Для исключения НОЧ-4 при попадании в МШУ сигнала с частотой в ДРЧ и с уровнем мощности, соответствующим верхней границе ДД, уровень второй гармоники в ДРЧ не должен превышать нижнюю границу ДД.

8. Расчет коэффициента шума линейной части приемника.

Рассчитывается коэффициент шума линейной части приемника $K_{ш}$ (до детекторов УОС или, если не обрабатывается сигнал ПЧ, до детекторов МУО).

9. Расчет чувствительности приемника.

Для полученной структуры приемника рассчитывается чувствительность. При этом полоса приемника вычисляется в соответствии с выражением [31]

$$\Delta f_{ш} = \int_0^{\infty} \left(\frac{K_{лт}(f)}{K_{лт0}} \right)^2 df, \quad (5)$$

где $K_{лт}(f)$ – АЧХ линейного тракта приемника, $K_{лт0}$ – коэффициент передачи на резонансной частоте.

Так как в каналах приемника последовательно включено множество полосовых звеньев, выражение (5) принимает более простой вид [31]:

$$\Delta f_{ш} \approx 1,1 \Delta f_{пч}. \quad (6)$$

10. Расчет крутизны АЧХ частотно-зависимого устройства из состава УИЧ.

Для определения крутизны ЧЗУ необходимо разрешение следующего противоречия. По возможности чувствительность УИЧ должна быть не хуже чувствительности основного приемника. Однако наличие ЧЗУ неизбежно снижает чувствительность, поэтому крутизна АЧХ ЧЗУ не должна быть высокой. В то же время для повышения разрешающей способности крутизну АЧХ необходимо повышать.

Для оценки максимально допустимой крутизны АЧХ частотно-зависимого устройства, при которой чувствительность УИЧ не хуже чувствительности основного приемника, выполняется расчет чувствительности УИЧ. Считая, что запас чувствительности УИЧ соответствует допустимому затуханию в ЧЗУ $L_{чзу}$, необходимая крутизна АЧХ ЧЗУ составит

$$S_{чзу} = L_{чзу} / \Delta f_{пч}.$$

11. Оптимизация схемы.

При необходимости повышения рассчитанной в п. 9 чувствительности P_0 схема оптимизируется.

Пример расчета

Ниже представлен пример расчета ШПрУ матрично-параллельного типа по разработанной методике. Исходными данными для расчета унифицированного приемного модуля (УПМ) являются:

– ширина полосы рабочих частот
 $\Delta f_{\text{пч}} = 10$ ГГц;
 – диапазон рабочих температур
 $\Delta T = [273 + (-40 \dots + 70)]$ К;
 – количество различаемых сигналов, различных по частоте и совмещенных по времени, – 10;
 – количество обрабатываемых сигналов, различных по частоте и совмещенных по времени, – 2;
 – технология обработки сигнала ПЧ – цифровая;
 – полоса входных сигналов УОС
 $\Delta f_{\text{уос}} = 2 \dots 3$ ГГц;
 – ДД входного сигнала – не менее 40 дБ;
 – отношение сигнал/шум на выходе ПЧ
 $q = 7$ дБ.

УОС выбрано цифровым с двумя каналами обработки ($G = 2$). Соответственно количество каналов МУО также равно двум. Заданной полосе РЧ соответствует ДПЧ от 2 до 3 ГГц, поэтому понижения частоты для согласования с УОС не требуется. Количество каналов с преобразованием частоты $N = 10$, количество каналов ПЧ равно 20. Исходя из ширины полосы РЧ приемника, определяются граничные частоты каналов и частоты гетеродинов.

Затухание канального фильтра в полосе зеркального канала должно быть не менее 40 дБ. При выборе фильтров пятого порядка на микрополосковой линии ослабление зеркального канала, рассчитанное по приближенной формуле (4), составит $\sigma_{\text{зк}} = 113$ дБ. Добротность Q рассчитана по выражению [35]

$$Q = \frac{Q_c Q_d}{Q_c + Q_d},$$

где $Q_c = \beta / 2a_c$ – составляющая добротности, определяемая потерями в проводниках (β – фазовая постоянная, рад/м, a_c – составляющая постоянной затухания, связанная с потерями в проводниках), $Q_d = 1 / \text{tg} \delta$ – составляющая добротности, обусловленная потерями в диэлектрике.

В качестве материала подложки выбран рекомендуемый для новых разработок ламинат RO4835 толщиной 0,508 мм и толщиной фольги 17 мкм. Покрытие фольги – золото. Для определения геометрических размеров проводников использована утилита TXLINE из состава программного пакета AWR Design Environment.

Количество каналов УИЧ составит $K = 21$.

Для ССГН выбрана схема на встречно-параллельных диодах 2A118AP-6 с потерями 14...15 дБ [16, 33]. Высокие потери смесителя вносят наибольший вклад в суммарный коэффициент шума приемника. Компенсация этих потерь может быть выполнена двумя способами:

- 1) введением на входе приемника одного УРЧ с большим коэффициентом усиления;
- 2) введением на входе приемника и смесителя УРЧ с небольшими коэффициентами усиления.

Использование двух УРЧ способствует более равномерному распределению мощности в узлах СВЧ-тракта. Кроме того, предварительные расчеты показывают, что для такого решения коэффициент шума на 3,5 дБ ниже.

В качестве УРЧ1 и УРЧ2 выбраны широкополосные модули производства «ЗАО «Микроволновые системы» ($K = 13$ дБ, $N = 4$ дБ, $P_{-1\text{дБ}} = 10$ дБм, $\Delta K = 2$ дБ, $\Delta t = -40 \dots + 85$ °С) [25]. При $K = 13$ дБ в верхней точке ДД мощность на выходах УРЧ1, УРЧ2 не превышает допустимую.

Для УПЧ выбран усилительный модуль AM245, изготавливаемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» (2...4,5 ГГц, $K = 20$ дБ, $N = 3$ дБ, $P_{-1\text{дБ}} = 20$ дБм, $\Delta K = 1$ дБ). Управляемый ключ построен на трех последовательно включенных микросхемах НМС197А производства Analog Devices.

Линия задержки может быть построена на основе симметричной полосковой линии. Согласно [36] для такой линии задержки затухание в диапазоне ПЧ составляет не более 13 дБ при габаритных размерах 60×45×2 мм. Методика расчета линии задержки с подробными рекомендациями по проектированию представлена в пособии [37].

Коэффициент шума приемника после добавления УРЧ1, УРЧ2 и УПЧ составляет $N_0 = 11,4$ дБ на входе УОС и 11,15 дБ на входе обнаружителя. Коэффициент передачи линейной части приемника (до входа УОС) составляет 3 дБ.

При коэффициенте шума $N_0 = 11,4$ дБ, рабочей температуре 70 °С, полосе обработки 500 МГц и отношении сигнал/шум $q = 7$ дБ чувствительность на входе УОС $P_0 = -97,5$ дБ(Вт), а чувствительность обнаружения $P_0 = -97,7$ дБ(Вт).

Выводы

В работе обоснованы научные и инженерные основы проектирования широкополосного матрично-параллельного приемника, предназначенного для использования в средствах РТМ и РТР. Схема основана на матричной структуре и дополнена техническими решениями, направленными на повышение технических показателей приемника. В предложенной схеме при широкой полосе мгновенного обзора и высокой чувствительности снижается неоднозначность определения частоты различного рода, обеспечивается возможность обработки короткого импульса и анализа фронта длинного импульса, уменьшается влияние источников внутрисистемных помех. Универсальность разработанного ШПрУ для средств РТМ и РТР подтверждается возможностями сопряжения с различными типами и частотными исполнениями УОС.

Согласно выявленным закономерностям (2), (3) для заданной ширины полосы РЧ существует оптимальное соотношение между шириной и граничными частотами полосы ПЧ. Показана принципиальная возможность разделения широкой полосы РЧ на несколько узких, что позволяет выбрать низкие про-

межзачастотные частоты и исключить преобразователи частоты на выходе приемника.

Полученные закономерности положены в основу методики проектирования ШПрУ матрично-параллельного типа, которая отличается использованием множества каналов обработки, средств снижения НОЧ, а также ограничений, обусловленных требованиями к четности количества преобразовательных каналов и отсутствию гетеродинных частот в ДРЧ.

С целью апробирования методики проектирования в заключение на примере рассмотрены особенности проектирования ШПрУ по предложенной схеме.

Литература

- Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. Т. XIII / под общ. ред. С.Б. Иванова. – М.: Оружие и технологии, 2006. – 695 с.
- Кривцун А.В. Незаконно действующие передатчики. Алгоритмы поиска, требования к аппаратуре [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=952&lvl=04.01.01.01.&p=1> (дата обращения: 23.03.2016).
- Радиомониторинг в системе обеспечения безопасности коммерческих объектов. Пособие для сотрудников служб безопасности, руководителей деловых и коммерческих структур [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=161&lvl=04.01.01.02.&p=1> (дата обращения: 23.03.2016).
- Лихачев В.П. Обоснование требований к взаимному расположению средств радиотехнического мониторинга и помех / В.П. Лихачев, Н.В. Лихачева // *Наукоёмкие технологии*. – 2010. – Т. 11, № 9. – С. 51–54.
- Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
- Леньшин А.В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. – Воронеж: Науч. книга, 2014. – 590 с.
- Радзиевский В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – 2-е изд. / В.Г. Радзиевский, А.А. Сирота. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
- Мельников Ю.П. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения / Ю.П. Мельников, С.В. Попов. – М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.
- Подстригаев А.С. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2015. № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>
- Подстригаев А.С. Влияние нелинейности элементов СВЧ-тракта на возникновение неоднозначности определения частоты в широкополосном матричном приемнике // *Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем*. – 2016. – № 1 (10). – С. 147–150.
- Перунов Ю.М. Зарубежные радиоэлектронные средства: в 4-х кн. – Кн. 1: Радиолокационные системы / Ю.М. Перунов, В.В. Мацукевич, А.А. Васильев. – М.: Радиотехника, 2010. – 336 с.
- Купряшкин И.Ф. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех / И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. – 460 с.
- Подстригаев А.С. Широкополосное приемное устройство станции радиоэлектронной борьбы / А.С. Подстригаев, А.И. Беззуб // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – № 4. – С. 37–44.
- Подстригаев А.С. Сравнительный анализ показателей эффективности способов снижения неоднозначности определения частоты, возникающей на стыках каналов матричного приемника / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, К.В. Гапеенко // *Доклады ТУСУРа*. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 21–26.
- Подстригаев А.С. Об использовании резистивного смесителя с субгармонической накачкой при реализации приемника станции РЭБ // *Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сб. науч. ст. по матер. II Всерос. НПК (25–27 ноября 2014 г.): в 2-х т. – Т. 1: Современное состояние и перспективы развития бортового радиоэлектронного оборудования, систем локации, опознавания, управления и РЭБ*. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 215–218.
- Белкин М.Е. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот в монолитном исполнении / М.Е. Белкин, Л.М. Белкин // *Электронная техника*. – Сер. 2: Полупроводниковые приборы. – 2010. – № 1. – С. 98–104.
- Белкин М.Е. Разработка МИС смесителя миллиметрового диапазона / М.Е. Белкин, Л.М. Белкин // *Электроника и микроэлектроника СВЧ: Всерос. конф.* СПб., 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mwelectronics.ru/2012/Oral/U39_M.E.%20Belkin_Razr%20abotka%20MIS%20smesitelya%20millimetrovogo%20diapazona.pdf (дата обращения: 17.01.2017).
- Maas S.A. *Nonlinear microwave and RF circuits*. – Norwood: Artech House, 2003. – 582 p.
- Добыкин В.Д. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянова, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2009. – 360 с.
- Патент 155553 РФ, МПК H04B 15/06. Приемное устройство / А.И. Беззуб, А.С. Подстригаев. – № 2014151261/08; заявл. 17.12.14; опубл. 10.10.15. Бюл. № 28. – 11 с.
- Патент 159589 РФ, МПК G01S 3/00. Обнаружитель сигнала / А.И. Беззуб, А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев. – № 2015138477/08; заявл. 09.09.15; опубл. 10.02.16. Бюл. № 4. – 7 с.
- Smetana D., Goncher G. Single Board Captures, Digitizes DC to 6 GHz // *Defense Electronics Magazine*. 2013. – URL: <http://defenseelectronicsmag.com/systems-amp-subsystems/single-board-captures-digitizes-dc-6-ghz>
- Перунов Ю.М. Зарубежные радиоэлектронные средства: в 4 кн. – Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы / Ю.М. Перунов, В.В. Мацукевич, А.А. Васильев. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с.
- Перунов Ю.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю.М. Перунов, К.И. Фомичев, К.И. Юдин. – М.: Радиотехника, 2008. – 416 с.
- Карпов Ю. Отечественные транзисторные усилители СВЧ // *Компоненты и технологии*. – 2007. – № 1. – С. 86–92.
- Белоусов А.А. Исследование возможных способов реализации сверхширокополосных ограничителей мощности диапазона СВЧ / А.А. Белоусов, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. V юбилейной Общерос. науч.-техн. конф. (Омск, 7–8 октября 2014 г.)*. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – С. 61–70.

27. Смогилев К.А. Радиоприемники СВЧ / К.А. Смогилев, И.В. Вознесенский, Л.А. Филиппов. – М.: Воениздат, 1967. – 556 с.

28. Проектирование радиоприемных устройств: учеб. пособие для вузов / М.С. Клич, А.С. Кривенко, Н.Г. Носикова, А.П. Сиверса. – М.: Сов. радио, 1976. – 487 с.

29. Давыдов Ю.Т. Радиоприемные устройства: учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / Ю.Т. Давыдов, Ю.С. Данич, А.П. Жуковский. – М.: Высш. шк., 1989. – 342 с.

30. Ред. Э.Т. Схемотехника радиоприемников: практ. пособие: пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 152 с.

31. Фомин Н.Н. Радиоприемные устройства: учебник для вузов / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 520 с.

32. Печерей Г.Н. Опыт создания сверхширокополосных приемников определения частотно-временных параметров сигналов с использованием техники сжатия / Г.Н. Печерей, В.В. Поелуев // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. V юбилейной Общерос. науч.-техн. конф. (Омск, 7–8 октября 2014 г.). – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – С. 196–202.

33. Подстригаев А.С. Исследование полосы пропускания резистивных смесителей с субгармонической накачкой для станции радиотехнической разведки // 25-я Международ. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015), Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.: матер. конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2015. – Т. 1. – С. 83–84.

34. Румянцев К.Е. Радиоприемные устройства. – М.: Академия, 2006. – 336 с.

35. Мазепова О.И. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазепова, В.П. Мещанов, Н.Н. Прохорова / под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979. – 336 с.

36. Подстригаев А.С. Разработка линии задержки сигнала промежуточной частоты приемного устройства радиолокационных сигналов / А.С. Подстригаев, А.И. Беззуб, В.А. Хвостов // Сб. тр. Третьей Всерос. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – СПб.: СПбГЭТУ, 2014. – С. 216–220

37. Подстригаев А.С. Проектирование СВЧ-устройств: практикум. – Брянск: БГТУ, 2015. – 123 с.

Подстригаев Алексей Сергеевич

Начальник научно-исследовательского сектора НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, ассистент каф. «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» (ЭРиЭС) Брянского гос. технического ун-та (БГТУ)
Тел. 8 (483-2) 54-64-67
Эл. почта: ar0d@ya.ru

Лихачев Владимир Павлович

Д-р техн. наук, профессор
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж
Тел.: 8 (473-2) 44-78-55
Эл. почта: lvp_home@mail.ru

Смоляков Андрей Владимирович

Студент каф. ЭРиЭС БГТУ
Тел.: 8-905-100-03-25
Эл. почта: andreismolyakow@gmail.com

Podstrigaev A.S., Likhachev V.P., Smolyakov A.V.

Design of wideband matrix-parallel receiver for radio monitoring and radio intelligence

The structure chart of wideband matrix-parallel receiver is based. Receiver is designed for using in radio monitoring and radio intelligence devices. A functioning of the scheme is described. The regularities in relation between operating and intermediate frequencies typical for designed scheme are revealed and formalized. Design method of the wideband receiver with technical features of the scheme is proposed. Example of the receiver design for the proposed method with usage of modern software is presented.

Keywords: matrix-parallel receiver, matrix receiver, radio monitoring, radio intelligence, receiver design method, wideband receiver, frequency plan.