

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 621.376.4

## Особенности проектирования приемоответчика X-диапазона, работающего в непрерывном режиме

*И.А. Соколов, Д.Ю. Скичко*

*АО «НИИ Микроприборов им. Г.Я. Гуськова» (г. Москва)*

## Peculiarities of Designing X-Band Transponder Operating in Continuous Mode

*I.A. Sokolov, D.Yu. Skichko*

*JSC «Scientific Research Institute of Microdevices named after  
G.Guskov», Moscow*

Рассмотрены основные проблемы проектирования приемоответчика X-диапазона. Приведены результаты разработки, а также экспериментальные данные измерений. Сделан вывод о соответствии техническим требованиям.

*Ключевые слова:* приемо-передающий модуль; приемоответчик; X-диапазон.

The main problems of designing the X-band transponder have been considered. The results of the development and experimental measurements have been presented. The conclusion about conformity to the technical requirements has been made.

*Keywords:* transceiver module; transponder; X-band.

**Введение.** Для управления и коррекции параметров полета беспилотных летательных аппаратов необходима надежная линия связи. Для ее реализации на борту объектов размещается устройство, называемое приемоответчиком. В простейшем случае это совмещенные приемник, передатчик и устройство управления и обработки информации. В зависимости от возлагаемых на приемоответчик задач каждая из его составляющих усложняется и в итоге может стать отдельным изделием.

В настоящей работе описан приемоответчик, спроектированный по техническому заданию. Приемоответчик состоит из нескольких составных частей: многоканального блока управления (БУ) и комплекта приемо-передающих усилительных модулей (МППУ). Основная проблема реализации предъявленных к приемоответчику требований – обеспечение работы передающего канала МППУ в непрерывном режиме. В от-

© И.А. Соколов, Д.Ю. Скичко, 2016

личие от приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток, работающих в импульсном режиме с длительностями импульсов не более 1 мс [1, 2], МППУ должен обеспечить мощность выходного сигнала не менее 15 Вт в течение нескольких десятков миллисекунд. В связи с этим возникают требования к элементной базе, рассчитанной на работу в непрерывном режиме, что приводит к выделению тепла, которое необходимо отводить [3, 4]. Однако габариты модуля (96×65×44 мм) не позволяют разместить все источники нагрева вдоль одной из граней.

**Требования к приемопередатчику X-диапазона.** Приемопередатчик предназначен для приема и передачи командно-телеметрической информации в X-диапазоне на расстояние порядка тысячи километров. Расчеты показывают, что для обеспечения энергетического потенциала радиолинии с учетом выбранного типа шумоподобного сигнала мощность передаваемого сигнала должна быть не менее 15 Вт, а коэффициент шума приемника – не более 4,5 дБ. Кроме того, для повышения достоверности передачи информации используется многоканальный пространственно-разнесенный прием с анализом отношения сигнал/шум (ОСШ) в каждом канале и последующим использованием канала с наилучшим ОСШ для передачи. Пространственное разнесение обычно осуществляется посредством множественных принимающих антенн, разнесенных на расстояние не менее 10 длин волн. Для реализации данного принципа приемопередатчик функционально должен состоять из следующих изделий: блока управления и не менее чем четырех приемо-передающих усилительных модулей.

МППУ предназначены для усиления передаваемых и принимаемых радиосигналов до требуемого уровня с необходимым коэффициентом передачи с наименьшими искажениями (ухудшениями) спектральных, временных и шумовых характеристик входных радиосигналов. Причем каждый МППУ должен быть двухканальным, т.е. содержать по два приемных и передающих канала, выбор которых осуществляется автоматически (программно) в зависимости от ориентации объекта в пространстве. Основные технические требования к МППУ следующие:

Диапазон частот .....	8,5 – 9,5 ГГц
Коэффициент усиления приемного канала .....	19±1,5 дБ
Коэффициент шума приемного канала, не более .....	4,5 дБ
Выходная импульсная мощность, не менее .....	15 Вт
КСВН по входу и выходу, не более .....	2

БУ должен осуществлять обработку приемного сигнала: усиление и перенос сигнала на промежуточную частоту 70 МГц, аналоговую фильтрацию, цифровую фильтрацию, оценку ОСШ в каждом из четырех каналов, демодуляцию и формирование передаваемого сигнала. С этой целью БУ должен содержать преобразовательно-усилительный тракт (ПУТ) и передающий тракт. Приведем основные технические требования к данным трактам:

Диапазон частот .....	8,5 – 9,5 ГГц
Вторая промежуточная частота ПУТ .....	70 МГц
Коэффициент усиления ПУТ .....	37,5±2,5 дБ
Коэффициент шума ПУТ, не более .....	7 дБ
Выходная мощность, не менее .....	500 мВт
КСВН по входу и выходу, не более .....	2

**Проектирование.** На рис.1 изображена функциональная схема МППУ. Два приемных и два передающих канала управляются одним контроллером. Усилительные тракты в передающих и приемных каналах выполнены на основе внутренне согласованных

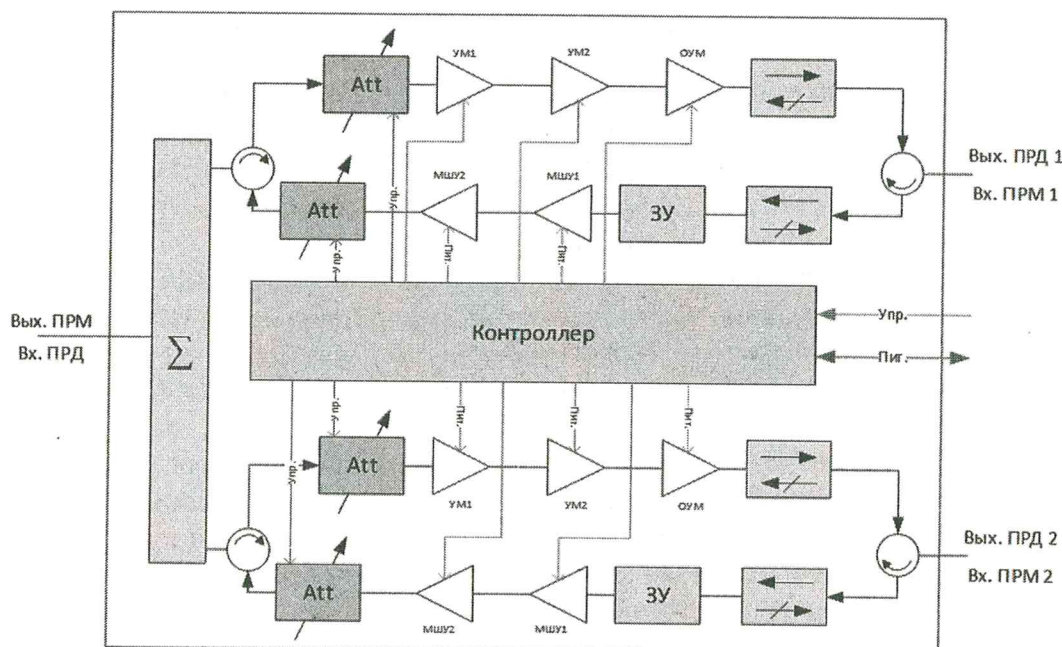


Рис. 1. Функциональная схема МППУ

GaAs СВЧ-микросхем. Контроллер осуществляет коммутацию питания усилителей приемных и передающих каналов, управляет коэффициентом затухания в каждом из каналов до 25 дБ с шагом 1 дБ в приемном канале и до 30 дБ с шагом 1 дБ в передающем канале, осуществляет подачу напряжения смещения на усилители передающего канала, а также сбор телеметрии с датчиков температуры оконечных каскадов и датчиков выходной мощности. Для дополнительной защиты приемного тракта, а также для уменьшения уровня вносимых шумов [5] в режиме передачи происходит отключение питания каскадов приемника.

Развязка не менее 22 дБ между передающими и приемными каналами осуществляется с помощью ферритовых циркуляторов, имеющих прямые потери не более 0,4 дБ в рабочем диапазоне частот. Приемный усилительный тракт построен по двухкаскадной схеме. Каждая из микросхем имеет коэффициент усиления не менее 18 дБ и коэффициент шума не более 1,7 дБ. Наиболее значительное влияние на результирующий коэффициент шума приемного тракта оказывают потери в циркуляторе (0,4 дБ) и защитном устройстве (1,2 дБ). Практически полученный результирующий коэффициент усиления ПУТ перекрывает требуемые 19 дБ даже с учетом потерь в циркуляторах и защитном устройстве.

Передающий тракт построен по трехкаскадной схеме с общим коэффициентом усиления 22 дБ. С учетом мощности входного сигнала 27 дБмВт (500 мВт), потерь в сумматоре/делителе (3 дБ), потерь в циркуляторах (~1 дБ) и подводящих высокочастотных цепях и разъемах (~1,5 дБ) выходная мощность передающего канала должна составить 43,5 дБмВт, т.е. около 23 Вт. Расчетная потребляемая мощность передающего канала равна 90 Вт, т.е. планируемый КПД ~25%. С учетом скважности, равной 6, средняя потребляемая мощность передающего канала составит 15 Вт.

Основной проблемой при конструировании МППУ оказалась реализация достаточно малых габаритных размеров модуля (96×65×44 мм), расположение разъемов и нивелирование завязок по полю.

Оконечные каскады передающих каналов, приемные каналы, а также циркуляторы, развязывающие вход приемника и выход передатчика, размещены на нижнем уровне. На среднем уровне расположены предварительные усилители передающих каналов, аттенуаторы приемных и передающих каналов, циркуляторы, развязывающие вход передатчика и выход приемника, а также делитель/сумматор каналов. На верхнем уровне находится плата контроллера. Между нижним и средним уровнями расположено основание, обеспечивающее экранизацию приемных каналов и развязку окончательного каскада от предварительных.

Функциональная схема БУ представлена на рис.2. Для оптимизации разработки и настройки изделия БУ разбит на четыре функциональные ячейки: устройство управления и цифровой обработки сигналов (УУЦОС); устройство управления и вторичных источников питания (УУВИП); преобразовательно-усилительные тракты (ПУТ); синтезатор частот (СЧ).

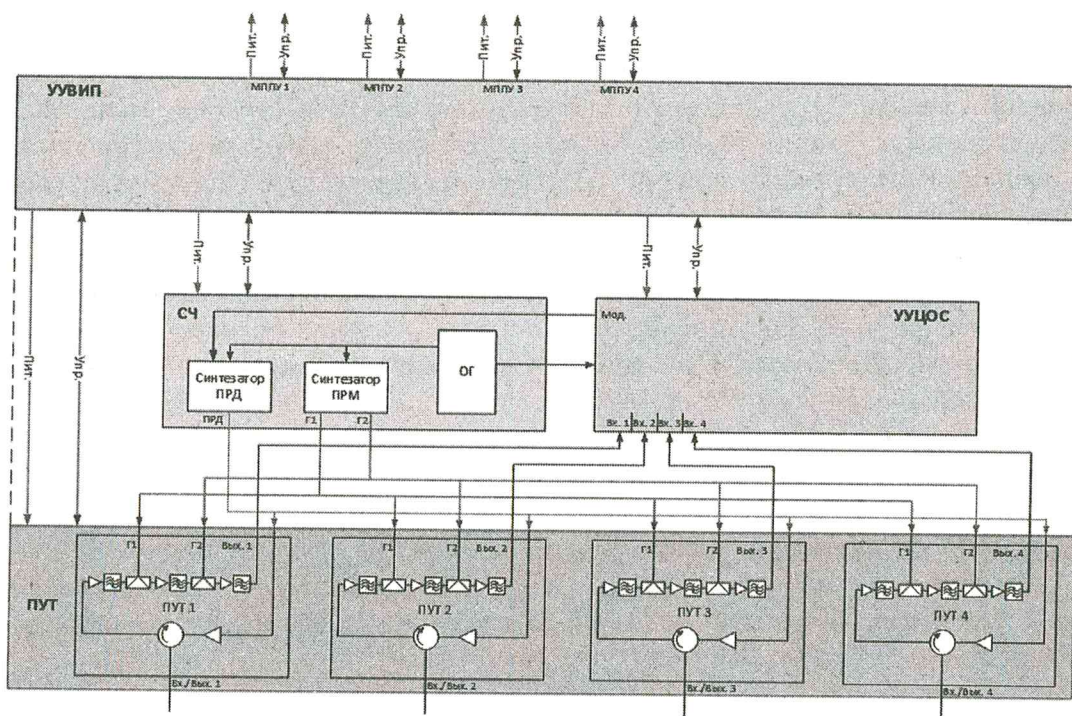


Рис.2. Функциональная схема БУ

Ячейка УУЦОС предназначена для цифровой обработки принимаемых сигналов, формирования передаваемого сигнала в низкочастотной области, управления ячейками из состава БУ, а также управления всеми МППУ. Ячейка УУВИП служит для формирования всех номиналов напряжений, необходимых для работы приемопередатчика, а также для трансляции сигналов управления от УУЦОС до СЧ и ПУТ и до всех МППУ. С помощью ячейки СЧ формируются опорный сигнал синхронизации (опорный генератор (ОГ)), сигналы первого и второго гетеродинов (синтезатор приемника (ПРМ)), а также передаваемый сигнал в рабочем диапазоне частот (синтезатор передатчика (ПРД)). Ячейка ПУТ предназначена для реализации четырехканального приема с двойным преобразованием частоты. В ячейке ПУТ расположены усилители, обеспечивающие уровень передаваемого сигнала не менее 27 дБмВт, необходимый для работы МППУ на максимальной мощности не менее 15 Вт.

БУ совместно с МППУ работает в двух режимах: прием и передача. В режиме приема СЧ обеспечивает формирование частот гетеродинов – первого, перестраиваемого, для формирования первой промежуточной частоты 1500 МГц и второго, фиксированного, на частоте 1570 МГц для формирования второй промежуточной частоты 70 МГц. Приемные каналы каждого из ПУТ содержат полосовые фильтры на промежуточных частотах. Полоса каждого фильтра определяется шириной полосы канала связи, которая составляет 20 МГц. Суммарный коэффициент передачи ПУТ составляет 44 дБ. На выходе оконечного каскада предусмотрено два управляемых аттенюатора. Один обеспечивает диапазон изменения затухания 25 дБ с шагом 1 дБ, второй предназначен для коррекции коэффициента усиления в диапазоне температур от  $-60$  до  $+85$  °С. Результирующий коэффициент шума ПУТ составил не более 6 дБ. С выхода каждого из каналов ПУТ приемный сигнал на частоте 70 МГц поступает на ячейку УУЦОС, где в каждом из каналов производится дополнительная фильтрация, оцифровка, обработка и демодуляция.

В режиме передачи УУЦОС формирует передаваемый сигнал на нулевой частоте, который поступает на фазовый манипулятор, расположенный в СЧ. Фазоманипулированный сигнал с выхода синтезатора поступает на предварительный усилитель, расположенный в ячейке ПУТ. Далее передаваемый сигнал мощностью не менее 27 дБмВт поступает на вход каждого МППУ. Выбор передающего канала осуществляется на основе оценки ОСШ в режиме приема и реализуется коммутацией питания на соответствующие каскады усилительного тракта.

**Изготовление и настройка. Полученные результаты.** Для настройки каждой ячейки из состава БУ, а также МППУ разработана специальная технологическая настроечная аппаратура (ТНА), соединенная с каждой ячейкой посредством технологических жгутов. Особенностью ТНА является ее унифицированность. В зависимости от подключаемой ячейки контроллер ТНА посылает специализированные команды управления (для ячейки СЧ это коды перестройки синтезатора, для ПУТ – управление аттенюаторами в приемном канале и т.д.). Использование ТНА позволило настроить автономно каждую ячейку из состава БУ, а также МППУ во всех режимах работы независимо от других составляющих приемопередатчика.

Многоэтажная конструкция МППУ реализована в виде двух основных ячеек: выходного усилителя мощности (ВУМ) и контроллера и предварительного усилителя (КПУ) (рис.3).

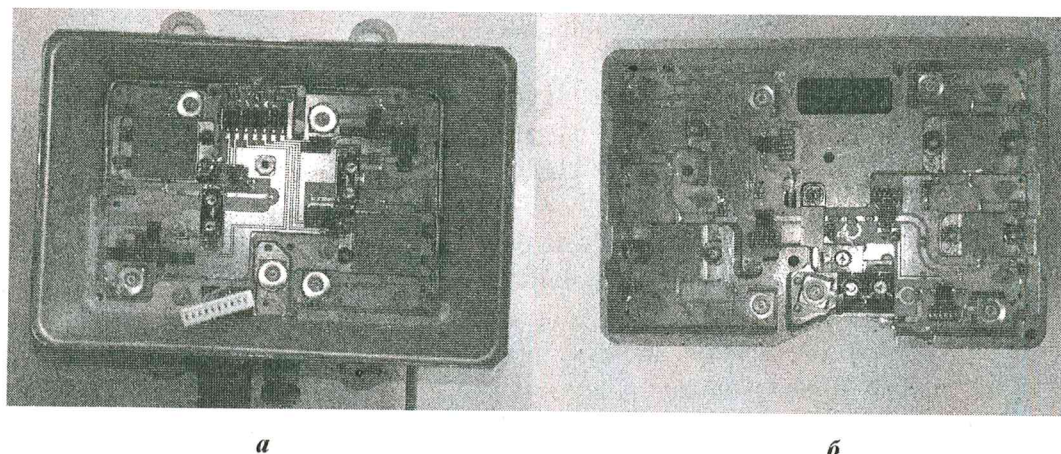
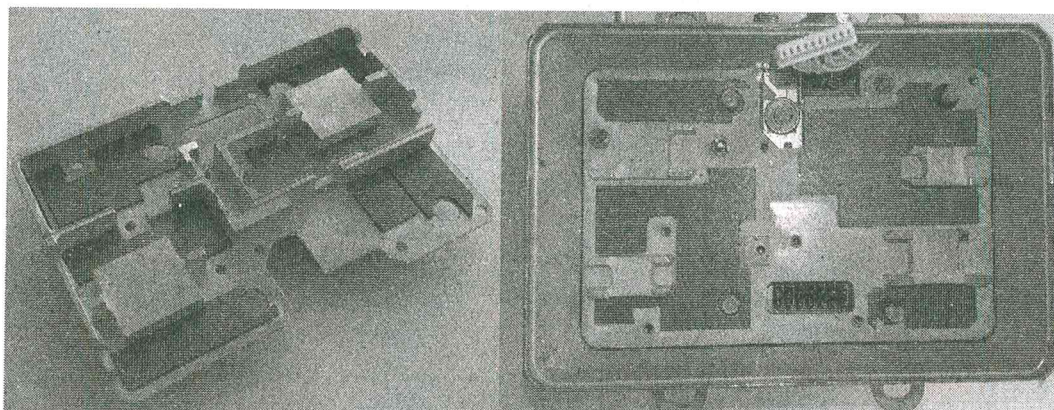


Рис.3. Ячейки ВУМ (а) и КПУ (б)

При сборке между ячейками ВУМ и КПУ располагается основание, обеспечивающее экранизацию приемных каналов, развязку предварительного и оконечного каскадов передающих каналов, а также теплоотвод транзисторов передающего канала (рис.4).



а б  
Рис.4. Реализация теплоотвода (а) и экранизации (б)

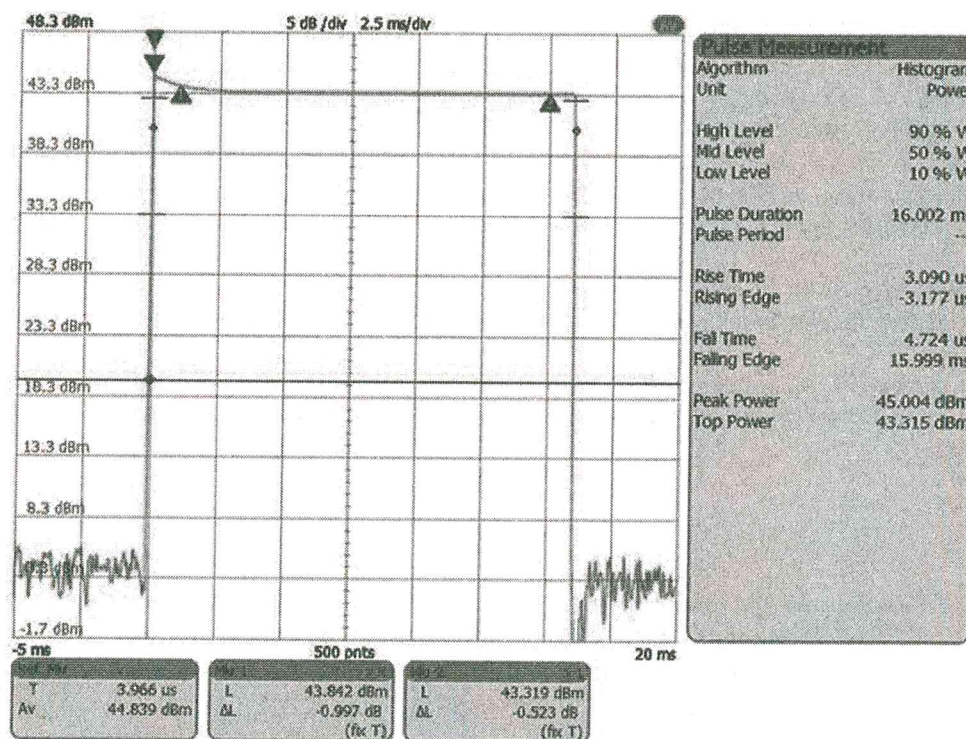


Рис.5. Эпюра радиоимпульса на выходе передающего канала МППУ

После настройки каждой ячейки осуществляется сборка и настройка устройств из состава приемопередатчика (БУ и МППУ) в целом. В результате проверки получены следующие технические характеристики БУ и МППУ:

Импульсная мощность сигнала на выходе МППУ .....	43,3 дБмВт
Коэффициент передачи приемного канала МППУ, не менее .....	20 дБ
Коэффициент шума приемного канала МППУ, не более .....	4,1 дБ
Коэффициент передачи приемного канала ПУТ, не менее .....	42 дБ
Коэффициент шума приемного канала ПУТ, не более .....	5,3 дБ
Мощность фазоманипулированного сигнала на выходе БУ, не менее. ....	28 дБмВт
Энергопотребление МППУ в режиме передачи, не более .....	2 Вт
Энергопотребление БУ в режиме приема (максимальное потребление в режиме максимального использования всех вычислительных мощностей) .....	100 Вт

Эпюра радиоимпульса на выходе передающего канала МППУ представлена на рис.5.

**Заключение.** В результате разработки приемопередатчика X-диапазона удалось реализовать бортовые устройства, сохраняющие работоспособность в жестких условиях эксплуатации и при этом имеющие высокие технические характеристики, полностью отвечающие заданным требованиям, а местами и превышающие их. Кроме того, благодаря плотной компоновке элементов и конструктивным особенностям в приемопередающем модуле удалось добиться суммарной выходной мощности порядка 45 Вт при объеме порядка 0,3 л.

### Литература

1. Коломейцев В. А., Езопов А. В., Семенов А. Э. Проблемы создания приемопередающих модулей активных фазированных антенных решеток // Антенны. – 2011. – № 11 (174). – С. 4–9.
2. Семенов Э. А., Бутерин А. В., Иванов А. В., Езопов А. В. Результаты разработки группового приемопередающего модуля АФАР X-диапазона // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010 – 2012 / Под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – С. 554–560.
3. Коломейцев В. А., Езопов А. В., Семенов А. Э. Исследование теплового режима группового приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки // Антенны. – 2012. – № 7. – С. 3–8.
4. Коломейцев В. А., Езопов А. В., Семенов А. Э. Тепловой режим выходного усилителя мощности приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки // Антенны. – 2012. – № 8. – С. 15–19.
5. Коломейцев В. А., Езопов А. В. Электромагнитное взаимодействие компонентов приемного и передающего каналов в приемопередающих модулях АФАР X-диапазона // Вестник СГТУ. – 2011. – Т. 2. – №1(55). – С. 17–21.

Статья поступила после доработки  
25 апреля 2016 г.

**Соколов Игорь Алексеевич** – кандидат технических наук, генеральный директор АО «НИИ Микроприборов им. Г.Я. Гуськова» (г. Москва). *Область научных интересов:* радиолокация, радионавигация, радиовидение, цифровая обработка сигналов, радиосвязь, бортовые системы, АФАР.

**Скичко Денис Юрьевич** – начальник отделения АО «НИИ Микроприборов им. Г.Я. Гуськова» (г. Москва). *Область научных интересов:* радиолокация, радионавигация, радиовидение, цифровая обработка сигналов, радиосвязь, бортовые системы, АФАР. **E-mail: skichko@niimp.ru**