

УДК 621.37

**ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ  
РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЦИФРОВЫХ СВЯЗИ  
(OBJECTIVES OF MEASURING AND EVALUATION OF RADIO TRANSFERRING  
DEVICES' SIGNAL PARAMETERS IN DIGITAL SYSTEMS OF COMMUNICATION)**

А. В. Юрченко, В. П. Разинкин, А. Д. Мехтиев, О. В. Алдошина, В. В. Югай  
A.V. Yurchenko, V. P. Razinkin., A. D. Mekhtiyev, O. V. Aldoshina, V. V. Yugai

Томский политехнический университет  
E-mail: oxi80-07@mail.ru

Проведен краткий обзор необходимых условий для обеспечения устойчивой передачи данных. Проанализированы алгоритмы обработки сигналов, которые основываются на классической теории приема сигналов на фоне аддитивного гауссовского шума без учета априорной неопределенности характеристик сигнала и помех. Предлагается построение СВЧ измерительных аттенуаторов высокого уровня мощности, которые обеспечат постоянное значение вносимого ослабления в широкой полосе частот с заданным уровнем неравномерности. Показано, что применение диплексеров на взаимодополняющих фильтрах нижних и верхних частот позволяет реализовать амплитудно-частотный корректор, согласованный в широкой полосе рабочих частот.

A short overview of the necessary conditions for sustained data transfer is given. Signal processing algorithms, which are based on classical theory of signal receiving in additive Gauss noise without prior uncertainty of signal characteristics and interference, are analyzed. It is proposed to build a microwave measuring high power attenuators that provide constant attenuation level in a wide frequency range with a given level of inequality. We study diplexers with complementary filters of low and high frequency, it allows to realize an amplitude-frequency equalizer for broad band operational frequency.

**Ключевые слова:**

Передача данных, цифровые системы, широкополосный корректор, фильтр нижних и верхних частот, канал связи.

(Product transmission, digital systems, broadband proofreader, filter of the lower and top frequencies, communication link)

Повышение помехоустойчивости цифровых систем передачи данных по радиоканалу является актуальной задачей для связи, телевидения и телекоммуникационных систем различного назначения. Основной проблемой, которую приходится решать при разработке цифровых радиоканалов, является то, что в общем случае прием сигналов ведется в присутствии шума, спектральная плотность которого может полностью или частично перекрывать спектр полезного сигнала, при этом усугублять ситуацию может присутствие узкополосных гармонических и полигармонических помех. Кроме того, в реальных каналах связи под воздействием различных случайных факторов, в том числе многолучевости распространения сигнала, проявляются изменения характеристик среды, которые называют замираниями. Для статистического описания быстрых и медленных замираний применяется релеевский закон, учитывающий независимость дискретных значений амплитуды сигнала в соседних символах. В ряде случаев в канале связи может проявляться доплеровское смещение частотного спектра, что также ухудшает помехоустойчивость и приводит к возрастанию вероятности ошибки передаваемого символа. Для повышения помехоустойчивости канала связи в условиях рассмотренных выше видов помех весьма эффективным является метод программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), который позволяет в несколько раз больше расширить полосу рабочих частот по сравнению с непосредственным расширением ширины спектра сигнала и соответственно повысить помехоустойчивость канала связи при меньших энергетических затратах. Это в свою очередь

улучшает электромагнитную совместимость радиотехнических и телекоммуникационных систем различного назначения.

Обеспечение устойчивой передачи данных радиопередающими устройствами цифровых систем связи с многопозиционными видами амплитудной и угловой модуляции, остается на сегодняшний день одной из наиболее важных задач обеспечения эффективности использования мощности, полосы частот и времени для высокоскоростной передачи данных с заданной вероятностью ошибки. Следует отметить, что наиболее перспективными видами модуляции с точки зрения спектральной и энергетической эффективности обладают такие виды модуляции, как относительная квадратурная фазовая модуляция с фазовым сдвигом 90 градусов (применяется для цифровых сотовых систем радиосвязи с временным многостанционным доступом- TDMA), модуляция с минимальным сдвигом (применяется в стандарте сотовой связи GSM). Особое место по помехоустойчивости и спектральной эффективности занимает такой вид модуляции как кодированное ортогональное частотное мультиплексирование – COFDM. Этот вид модуляции успешно применен в системах эфирного цифрового телевидения стандарта DVB-T2 и цифровом спутниковом и эфирном радиовещании. Помехоустойчивость данного вида модуляции практически приближается к теоретическому пределу, в частности для цифрового телевидения допустимый уровень соотношения сигнал/шум составляет 10,8 дБ. Ослабление действия мешающих отражений, шумов и импульсных помех может быть обеспечено с помощью цифровой линейной и нелинейной фильтрации. Практическое использование фильтрации различного вида позволяет сократить защитные интервалы, выполнить требования электромагнитной совместимости с другими радиотехническими системами, ослабить действие внешних помех и обеспечить требуемую достоверность приема.

Важным аспектом повышения комплексной эффективности цифровых систем передачи данных является мониторинг и измерение параметров выходного сигнала мощных радиопередающих устройств. Для этого необходимы сверхширокополосные измерительные аттенюаторы высокого уровня мощности. Для построения таких аттенюаторов в данной работе предлагается использовать планарные пленочные резисторы, выполненные на диэлектрической подложке из бериллиевой керамики. Отметим, что теплопроводность бериллиевой керамики приближается к теплопроводности латуни, что позволило получить хороший отвод тепла на металлический радиатор при одновременном обеспечении минимальной паразитной емкости и индуктивности пленочного резистора. Исследования авторов показали, что применение таких пленочных резисторов, нанесенных на бериллиевую керамику (республика Казахстан имеет большие запасы бериллия) позволяет создать многоканальные сверхширокополосные измерительные аттенюаторы на уровень входной допустимой мощности 2 кВт и более в полосе рабочих частот до 1 ГГц. Данные параметры измерительных аттенюаторов позволяют применять их для цифровых передатчиков телевидения, систем связи и телекоммуникаций. Их функциональные свойства и технические характеристики соответствуют действующим в настоящее время стандартам Казахстана и России. Экономическая эффективность применения одного сверхширокополосного аттенюатора высокого уровня мощности по сравнению с комплектом узкополосных аттенюаторов очевидна.

Известные в настоящее время приближенные математические модели маломощных пленочных резисторов в сосредоточенном и одномерно распределенном базисе справедливы на небольшом уровне мощности и на умеренно высоких частотах, поскольку весьма приближенно и грубо учитывают реактивные параметры основных элементов аттенюаторов – пленочных резисторов. Для контроля параметров выходных сигналов мощных радиопередающих устройств необходимо проектировать аттенюаторы, выполненные на мощных пленочных резисторах, в которых проявляется неравномерное распределение тока в поперечном сечении резистивной пленки, краевые и торцевые эффекты, неоднородность электромагнитного поля и ряд других малоисследованных эффектов. Анализ данной проблемы показал, что известные методы построения измерительных аттенюаторов не позволяют на высоком уровне мощности обеспечить требуемые широкополосные свойства. Поэтому актуальной задачей является создание теоретических основ построения широкополосного измерительного оборудования для высокочастотных сигналов большой мощности.

Анализ технических параметров управляемых устройств СВЧ, достигнутых на сегодняшний день, показывает, что основными тенденциями их развития являются: повышение

мощности входного высокочастотного сигнала; улучшение качества согласования; расширение полосы рабочих частот; увеличение динамического диапазона изменения управляемых параметров; обеспечение требуемого уровня подавления высших и комбинационных гармонических составляющих; применение цифровых методов для дискретного изменения управляемых параметров; повышение быстродействия; уменьшение массогабаритных показателей и интегральная микроминиатюризация. В настоящее время в ведущих европейских странах, США, в странах юго-восточной Азии и в Китае резко возрос объём исследований, практических разработок и публикаций по проблеме построения управляемых устройств СВЧ высокого уровня мощности. В России также проводятся аналогичные исследования многими научно-исследовательскими институтами, предприятиями, вузами и научно-производственными фирмами. Тем не менее, имеется острая потребность в управляемых устройствах, обеспечивающих совместную работу приёмо-передающих трактов фазированных антенных решёток с большой мощностью излучения. Широкополосные управляемых устройств СВЧ необходимы для построения измерительного оборудования, используемого для настройки и проверки параметров радиовещательных и телевизионных передатчиков. Управляемые устройства востребованы операторами связи для реализации цифровых модуляторов и компенсаторов нелинейных искажений в усилительных трактах дециметрового и сантиметрового диапазона, а также для подключения резервных блоков. Однако, перечисленные выше потребности сдерживаются отсутствием управляемых устройств нового поколения, способных работать в предельно широкой полосе частот на уровне входной мощности до (1-2) кВт в непрерывном режиме. Отметим, что управляемые СВЧ устройства высокого уровня мощности, в том числе коммутационные, входят в состав измерительных СВЧ аттенуаторов и обеспечивают расширение их функциональных возможностей.

При построении СВЧ измерительных аттенуаторов высокого уровня мощности необходимо обеспечить постоянное значение вносимого ослабления в широкой полосе частот с заданным уровнем неравномерности. Широкополосные аттенуаторы содержат мощные пленочные резисторы и согласующее-компенсирующие цепи, предназначенные для компенсации влияния паразитных реактивных параметров пленочных резисторов. При последовательно-параллельном включении резисторов различной мощности вносимое ослабление аттенуатора имеет значительную частотную зависимость. Для устранения этого эффекта в работе предложено применить согласованный амплитудно-частотный корректор, выполненный на основе управляемых аттенуаторов и частотно-разделительных устройств (диплексов), как показано на рисунке 1.

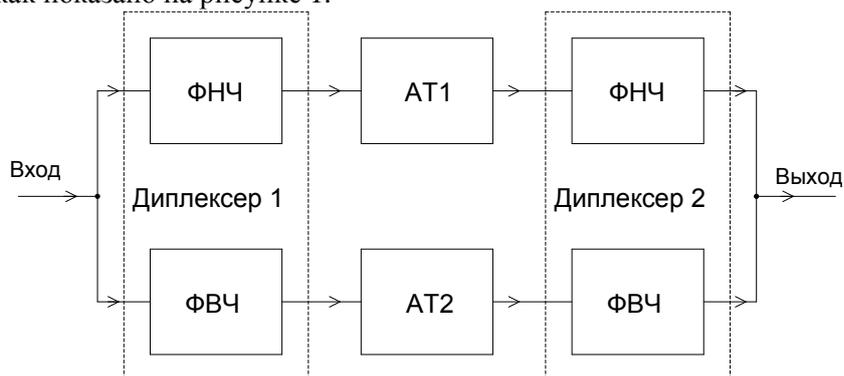


Рис. 1. Структурная схема амплитудно-частотного корректора

Диплексы, входящие в состав широкополосного корректора, содержат дополняющие друг друга по входному импедансу фильтры нижних и верхних частот. В результате компьютерного моделирования установлено, что взаимное влияние друг на друга фильтров приводит к выполнению частотно независимого условия согласования диплекса по входу

$$\dot{Y}_{NF}(f) + \dot{Y}_{HF}(f) = 1 = const, \quad (1)$$

где  $\dot{Y}_{NF}(f)$  - комплексная нормированная входная проводимость фильтра нижних частот;  $\dot{Y}_{HF}(f)$  - комплексная нормированная проводимость фильтра верхних частот;  $f$  - частота входного высокочастотного сигнала.

Из условия (1) и условия унитарности матриц рассеяния диплексера, представляющего собой шестиполосник без потерь, следует еще два интересных условия для диплексера с согласованными нагрузками:

$$\begin{cases} S_{11}(f) = 0 \\ |S_{21}(f)|^2 + |S_{31}(f)|^2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_{ij}(f)$  - параметры рассеяния диплексера.

Управляя вносимым ослаблением аттенуаторов, можно обеспечить любую форму амплитудно-частотной характеристики корректора – подъем высоких частот, либо подъем на низких частотах. На форму частотной характеристики рассматриваемого корректора влияет также выбор граничных частот и количество элементов в фильтрах диплексера. Анализ, учитывающий соотношения (10) и (11), показывает, что результирующая амплитудно-частотная характеристика корректора  $\tilde{S}_{21}$  описывается соотношением

$$|\tilde{S}_{21}(x)| = 20 \lg \frac{|S'_{21}|}{\sqrt{1+x^{2n}}} + 20 \lg \frac{|S''_{21}| \cdot x^n}{\sqrt{1+x^{2n}}} \text{ [дБ]},$$

где  $x = \frac{f}{f_0}$  - нормированная частота;  $f_0 = \sqrt{f_{NF} f_{HF}}$  - частота стыковки фильтров диплексера;  $f_{NF}$  - граничная частота фильтра нижних частот;  $f_{HF}$  - граничная частота фильтра верхних частот;  $n$  - порядок фильтров диплексера;  $S'_{21}$  - коэффициент передачи аттенуатора АТ1;  $S''_{21}$  - коэффициент передачи аттенуатора АТ2.

На рис. 2 приведена частотная характеристика предлагаемого корректора, соответствующая случаю  $|S'_{21}|_{\text{дБ}} > |S''_{21}|_{\text{дБ}}$ .

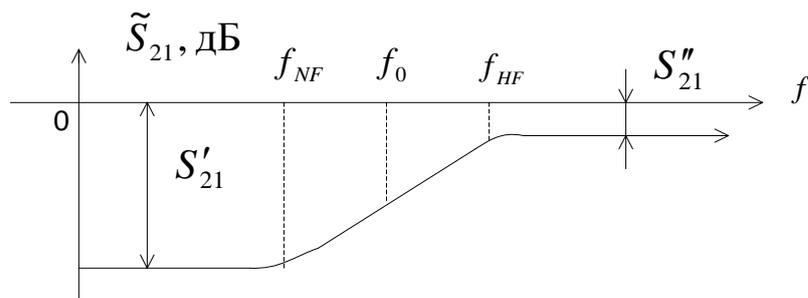


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика корректора

### Заключение

Реальная эффективность работы систем связи, телекоммуникаций и телевидения не может быть обеспечена без создания широкополосного измерительного оборудования для оценки большого числа параметров выходного сигнала радиопередающих устройств. Поэтому в данной работе значительное внимание уделено вопросам разработки математических моделей, методов расчета и проектирования данного оборудования, превосходящего в несколько раз имеющиеся в настоящее время аналоги по уровню входной мощности и полосе рабочих частот. Это достигнуто за счет применения декомпозиционного подхода как к отдельным элементам измерительного оборудования, так к структурам его построения. Применение диплексеров на взаимодополняющих фильтрах нижних и верхних частот позволило реализовать амплитудно-частотный корректор, согласованный в широкой полосе рабочих частот, при этом динамический диапазон коррекции определяется вносимыми

ослаблениями аттенуаторов, входящих в состав корректора. При использовании управляемых аттенуаторов корректор становится регулируемым. Предложенный корректор может быть использован в радиоизмерительном оборудовании, а также в системах кабельного телевидения и телекоммуникационных системах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разинкин В.П., Мехтиев А.Д., Калиаскаров Н.Б. Проектирование высокочастотных фильтров Баттерворта методами компьютерного моделирования при помощи Nuhertz Filter// Сагиновские чтения №4: труды Международной научной конференции, ч. 2, Караганда: Изд-во КарГТУ, 2012. – С.154-156.
2. Разинкин В.П., Мехтиев А.Д., Абросимов А.А. Амплитудный детектор на основе фильтрового диплексера//Современные проблемы телекоммуникаций: российская научно-техническая конференция, Новосибирск, 2012. – С. 242-243.
3. Разинкин В.П., Мехтиев А.Д., Абросимов А.А., Воробьева Ю.С. Метод расчета переходных процессов в СВЧ коммуникационных устройствах// Актуальные проблемы электронного приборостроения: XI международная конференция т. 4, Новосибирск, 2012. – С. 60-62
4. Разинкин В.П., Мехтиев А.Д., Абросимов А.А. Анализ переходных процессов в нестационарных частотно-избирательных цепях // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2(47) .– С.115-120.
5. Патент РФ №2449431. Многоэлементная СВЧ нагрузка. Аубакиров К.Я., Разинкин В.П., Хрусталева В.А., Рубанович М.Г., Востряков Ю.В., Воробьев П.М. Оpubл. 27.04.2012. БИ №12.
6. Патент РФ №2439754. Амплитудный корректор. Разинкин В.П., Хрусталева В.А., Рубанович М.Г., Востряков Ю.В. Оpubл. 10.01.2012. БИ №1.

#### Сведения об авторах:

**Юрченко А. В.:** г. Томск, д.т.н. профессор, заведующий лабораторией ИНК Томского политехнического университета, e-mail: [niipp@inbox.ru](mailto:niipp@inbox.ru), тел. 8 (3822) 41-89-11

**Разинкин В. П.:** д.т.н., профессор, заместитель декана факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета, e-mail: [razinkin@corp.nstu.ru](mailto:razinkin@corp.nstu.ru), тел. +7 (383) 346-08-34

**Мехтиев А. Д.:** к.т.н, доцент Карагандинского государственного технического университета, e-mail: [barton.kz@mail.ru](mailto:barton.kz@mail.ru), тел. +77078750060

**Алдошина О. В.:** аспирант кафедры ИИТ Томского политехнического университета, e-mail: [oxi80-07@mail.ru](mailto:oxi80-07@mail.ru), тел. 87079217912

**Югай В. В.:** докторант Казахского национального технического университета им. К. И.Сатпаева, e-mail: [slawa\\_v@mail.ru](mailto:slawa_v@mail.ru), тел.: +77003625437