

ЦИФРОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ В МОБИЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Продолжаем рассказ о цифровых антенных решетках в системах спутниковой связи (начало см. в предыдущем номере, с. 10–15). Вторая часть статьи посвящена как широко известным системам, так и перспективным проектам.

INMARSAT-4

Гибридная технология ЦАР используется в спутниках серии Inmarsat-4 [8]. Первый из них (Inmarsat-4 F1) запустили на геостационарную орбиту (точка стояния 64° в.д.) 11 марта 2005 года. В зоне его обслуживания находятся Европа, Африка, Центральный Восток и Азия. КА Inmarsat-4 F2 был запущен 8 ноября 2005 года [9], а в конце 2005 года переведен в рабочую точку 53° з.д. В зону покрытия двух этих КА попадает около 85% земной суши. С добавлением в 2008 году в состав спутниковой группировки третьего аппарата этой серии, размещенного на геостационарной орбите над Тихим океаном, КА Inmarsat-4 покроют практически всю территорию земного шара, за исключением полярных областей, создав космический сегмент глобальной сети спутниковой широкополосной связи BGAN (Broadband Global Area Network). Новая сеть должна обеспечить мобильных пользователей большим спектром телекоммуникационных услуг (широкополосный доступ в Интернет, мобильная факсимильная и телефонная связь, трансляция сигналов цифрового телевидения, HDTV на стационарные и подвижные объекты, передача видеоизображений по запросам абонентов, видеоконференцсвязь и т.д.) на скорости обмена до 492 кбит/с. Кроме того, Inmarsat-4 поддерживают стандарты сотовой связи третьего поколения. Их канальная емкость больше, чем у предшественников (Inmarsat-3), в 20 раз, а мощность сигналов – в 60 раз.

КА Inmarsat-4 весит около 6 т и является пока самым тяжелым из всех когда-либо запущенных коммерческих спутников, он разработан и построен фирмой EADS Astrium на базе спутниковой платформы Eurostar E3000. Бортовое оборудо-

вание функционирует в L-диапазоне (1,6/1,5 ГГц). КА, подобно спутникам Thuraaya, оснащен большим рефлектором, формирующим один глобальный луч, 19 дополнительных широких и, по разным данным, 120 [8], 156 [10] или даже 228 [9] узких лучей, излучаемых ФАР производства канадской компании EMS Technologies. Широкие лучи со спутника могут покрывать сразу несколько городов, а узкие – фокусироваться на отдельных мегаполисах. Система имеет возможность динамически адаптироваться под загрузку каналов. Если в каком-либо регионе трафик возрастает, туда направляется дополнительный луч. Маршрутизация трафика между лучами происходит непосредственно на борту КА, что позволяет эффективно использовать частотный ресурс спутника. Аппарат обеспечивает связь пользователей с наземной станцией сопряжения или напрямую с другими абонентами сети.

Схема бортовой ЦАР Inmarsat-4 реализована по гибридно-му принципу (рис.7). При приеме сигналов сначала используются аналоговые диаграммообразующие схемы (ДОС) – матрицы на 8 входов и 8 выходов. Окончательно многолучевая ДН синтезируется в цифровом формирователе на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ). При этом число модулей пространственного ДПФ равно числу СВЧ-матриц, а сигналы на входы процедуры ДПФ подаются с одноименных выходов аналоговых ДОС, например, со всех первых выходов аналоговых ДОС – на один модуль ДПФ, со всех вторых – на другой и т.д. Использование в первом слое диаграммообразования аналоговых матриц позволяет, по мнению разработчиков, упростить аппаратную реализацию гибридной ЦАР, заменив один модуль ДПФ размерностью 120 и более точек



(сигнальных входов) несколькими модулями ДПФ меньшей размерности. Для схемы на рис.7 120-точечная процедура ДПФ заменена восемью 15-точечными процедурами, что является более простым решением. Таким образом, при гибридной реализации ЦАР число малоразмерных БПФ определяется числом выходов аналоговой ДОС.

Ключевой элемент системы управления КА с ЦАР – мощный процессорный блок. На борту Inmarsat-4 размещены два отдельных процессорных модуля, обслуживающих передающую и приемную ЦАР (рис.8). Каждый процессорный модуль включает около 2800 заказных СБИС восьми типов, выполненных по 0,65-мкм технологии фирмой Honeywell со средним числом логических блоков около 300 тысяч [10]. В общей сложности на борту используется около 300 АЦП и ЦАП с малой рассеиваемой мощностью. Суммарная мощность, потребляемая цифровым сегментом, составляет 1,8–2,0 кВт. Частота обновления отсчетов входных/выходных АЦП/ЦАП составляет 200 кГц, что определяет полосу пропускания каждого из узких лучей.

ДРУГИЕ ИНТЕРЕСНЫЕ ПРОЕКТЫ

Аналогичные проекту Thuraaya технические решения предусмотрены и в других разработках региональных ССМС, что

лишний раз свидетельствует о технологической готовности мировой индустрии к реализации идеологии ЦАР. В частности, подобная концепция многолучевой антенной решетки положена в основу японского проекта квазистационарной (Quasi-GEO) системы спутниковой связи, продвигаемого компанией Mitsubishi Electric [11]. Космическую часть данной системы, по версии Mitsubishi Electric, должны составлять несколько спутников, расположенных на эллиптической орбите с апогеем 42 тыс. км и наклоном орбиты 45°. На каждом спутнике планируется развернуть плоскую активную антенную решетку с ЦДО в S-диапазоне (2,6 ГГц) (рис.9). В результате формируется 160 узких цифровых лучей, обеспечивающих покрытие всей сухопутной территории Японии с поддержкой до 100 тыс. каналов двухсторонней связи – примерно 5 млн. абонентов. Для антенны предусматривается использовать материал на основе кевлара толщиной 2 мм с плотностью 300 г/м². Предполагаемый размер развернутой ЦАР может составить 45×45 м. При этом 16-элементный квадратный фрагмент такой антенны имеет коэффициент усиления 19,3 дБ. В дополнение к задачам мобильных коммуникаций, рассмотренная квазистационарная система ориентирована на систему персональной связи военного назначения.

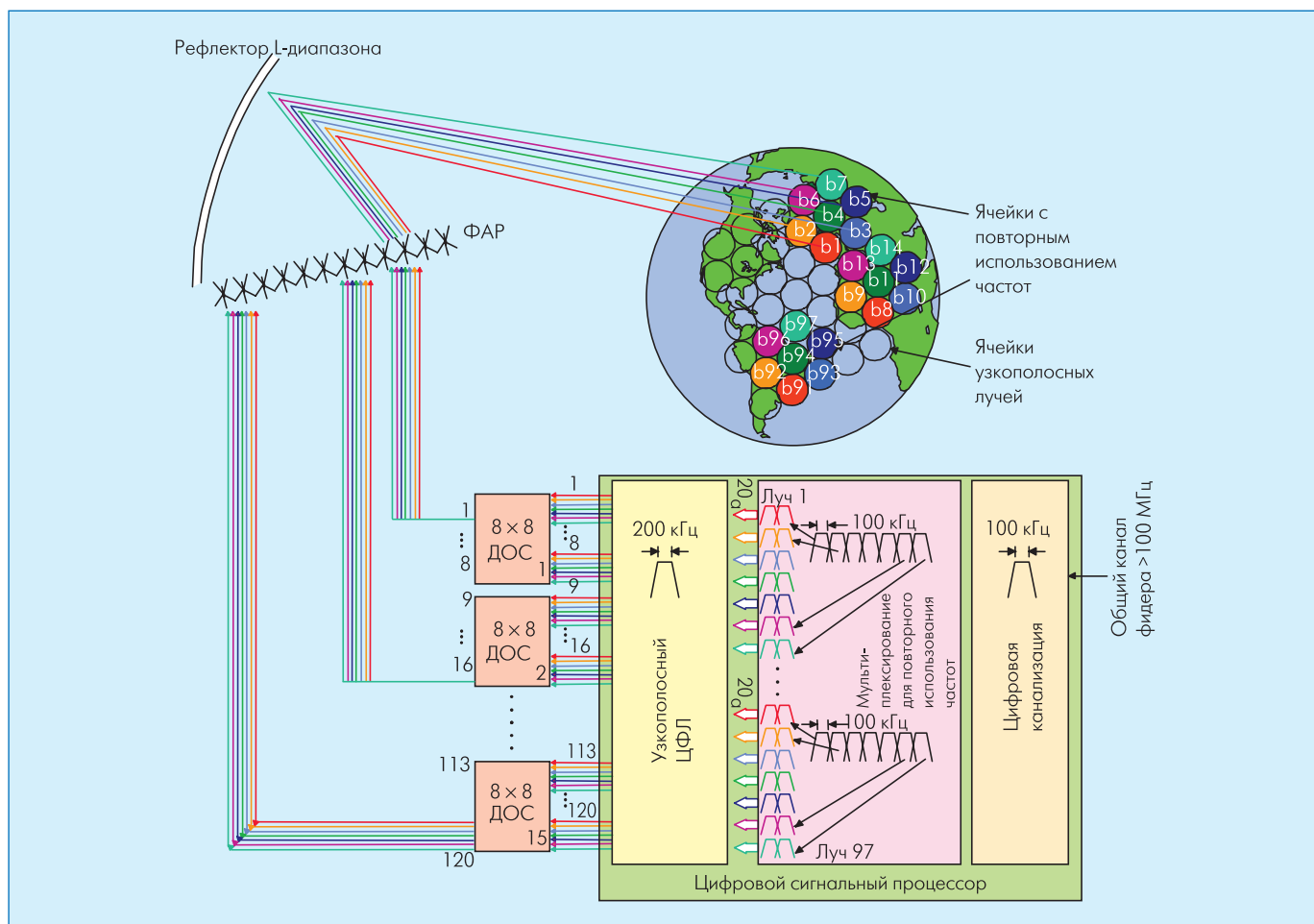


Рис.7 Принцип построения бортовой ЦАР Inmarsat-4 [8]

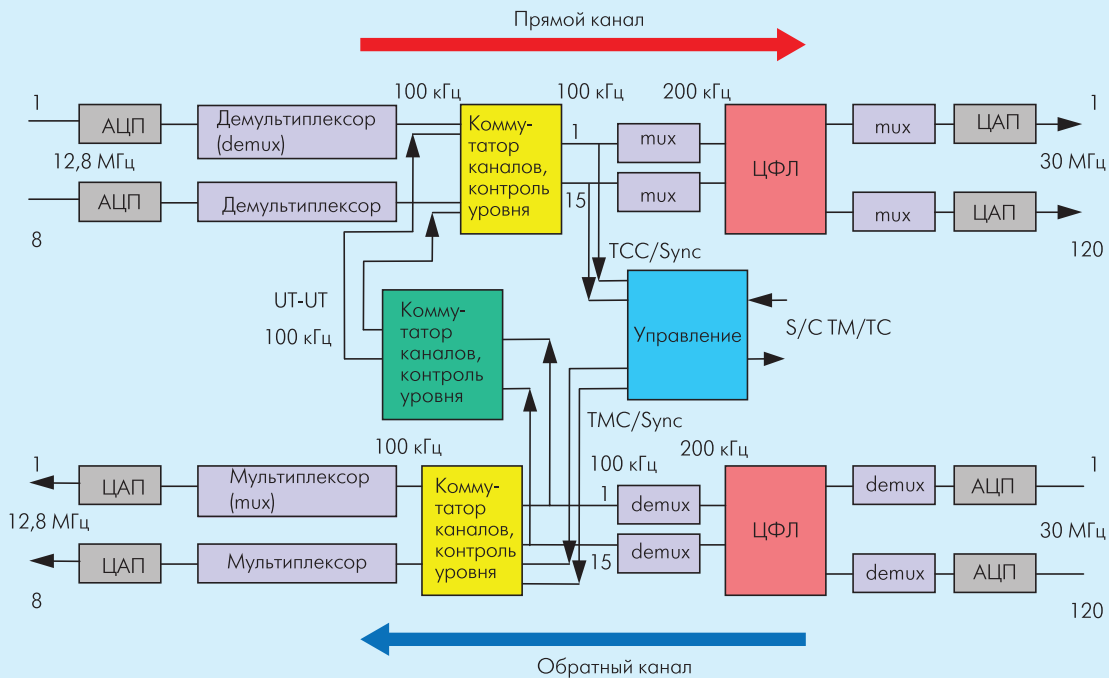


Рис. 8 Общая структура цифрового сегмента прямо-передающей ЦАР Inmarsat-4 [8]

Важным шагом в реализации рассмотренной концепции фирмы Mitsubishi Electric стал запуск 18 декабря 2006 года разработанного при ее участии технологического спутника ETS-8 (Kiku-8) (рис.10). Его успешный вывод на геостационарную орбиту в позицию 146° в.д. завершился штатным развертыванием антенных систем и переходом к проведению запланированных экспериментов. В отличие от Thuraya, на спутнике ETS-8 установлен не один, а два крупногабаритных параболических антенных рефлектора размером 19,2×16,8 м. Каждый из них состоит из 14 гексагональных фрагментов зонтичного типа [12], обтянутых тонким (около 2,4 мм) сетчатым материалом. Один рефлектор используется для формирования мно-

голучевой ДН на передачу в диапазоне 2,5–2,54 ГГц, а другой – на прием (2,65–2,66 ГГц). Перед фокальной плоскостью каждого рефлектора на несущем корпусе спутника расположен 31 микрополосковый облучатель. Усилители мощности 10 и 20 Вт обеспечивают среднюю суммарную мощность излучения всех синтезированных лучей около 400 Вт. Общая масса спутника достигает 3 т, габариты с развернутыми антенными рефлекторами и солнечными батареями составляют 42×37 м. Пять основных лучей ДН передающей и приемной антенн, покрывающих всю территорию Японии, формируются с помощью двух аналоговых диаграммообразующих матриц [12]. Дальнейшее ЦДО позволит синтезировать набор вторичных лучей. В апреле 2008 года конструкция большого складного рефлектора аппарата Kiku-8 получила награду японского общества инженеров механики – медаль "За выдающуюся разработку".

Как видно, технические аспекты Thuraya, японского проекта и Inmarsat-4 во многом схожи, что подтверждает общую тенденцию превращения ЦФЛ в базовую технологию региональных систем спутниковой связи. Над ее совершенствованием интенсивно работают многие известные фирмы. В частности, интерес представляет концепция использования фокальных цифровых антенных решеток (Focal Array Fed Reflector, FAFR), которой придерживается фирма Alcatel-Space [13]. Поскольку смещение облучателей из фокуса зеркальной антенны приводит к фазоамплитудным деформациям поля в раскрые рефлектора [14], для решения данной проблемы в работе [13] предложено использовать цифровую коррекцию волнового фронта. Суть ее сводится к учету эквивалентности процесса трансформации электромагнитного поля в зеркальной антенне и математической операции преобразования Фурье.

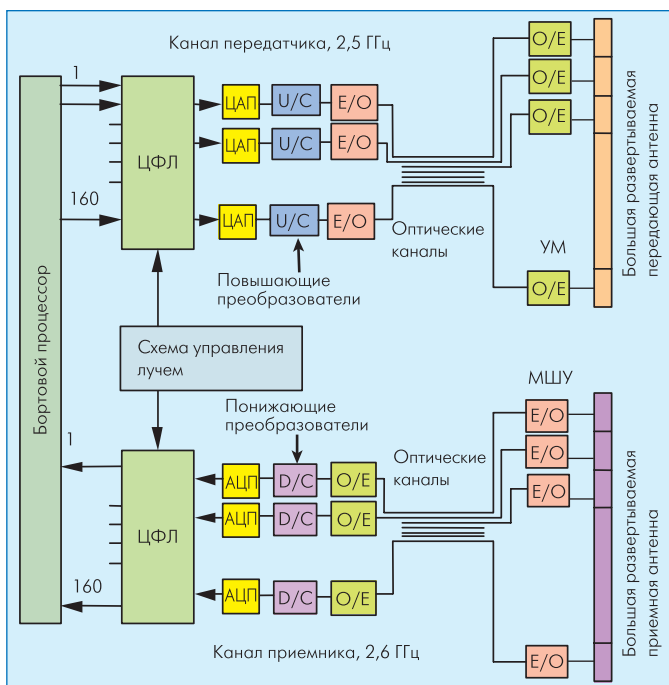


Рис. 9 Структурная схема перспективной ЦАР спутника связи Mitsubishi Electric

В режиме приема сигналов (рис.11) в FAFR отраженные от рефлектора электромагнитные волны подвергаются пространственной дискретизации, поступая на входы антенных элементов фокально расположенной ЦАР. Поскольку часть антенных элементов вынесена за пределы фокуса зеркальной антенны, в точках их расположения амплитудно-фазовое распределение поля будет отличаться от картины, соответствующей нормально падающей волне. При этом набег фаз в решетке от канала к каналу будет изменяться нелинейно. Чтобы внести коррективы в амплитудно-фазовое распределение откликов ЦАР, в работе [13] предложено искусственно восстанавливать вид амплитудно-фазового фронта каждой из волн перед их падением на рефлектор. Для этого после аналого-цифрового преобразования сигналов по выходам приемных каналов фокальной ЦАР выполняется обратное пространственное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ). В идеале при этом должен быть получен массив отсчетов напряжений, соответствующий плоскому волновому фронту. Однако поскольку условия возбуждения наведенных токов в антенных элементах фокальной решетки не идентичны, результат будет существенно отличаться от идеального. Поэтому с помощью ОБПФ волновой фронт удастся восстановить лишь частично, и для устранения амплитудно-фазовых искажений следует применить последующую процедуру цифровой коррекции. Основная ее идея состоит в амплитудно-фазовом

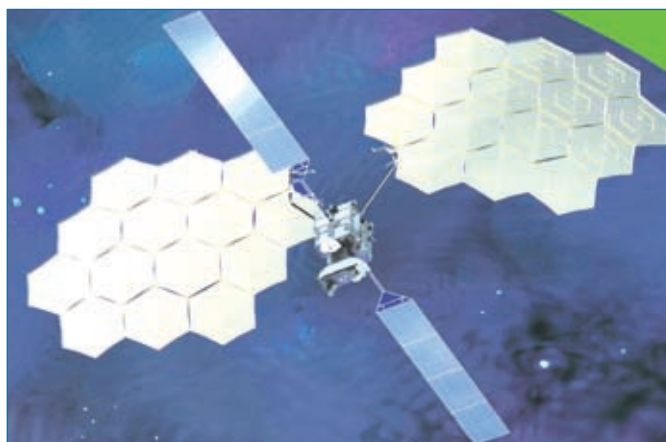


Рис. 10 Японский технологический спутник связи Kiku-8

взвешивании цифровых откликов приемных каналов, обеспечивающем минимальное среднеквадратическое отклонение массива их значений от плосковолнового распределения (см. рис.11). После такого искусственного выравнивания волнового фронта далее выполняется прямое пространственное БПФ, формирующее набор неискаженных парциальных лучей диаграммы направленности приемной антенны. При этом межканальный набег фаз будет аналогичен ЦАР, лишенной рефлектора.

Применение ЦАР возможно не только на борту спутников, но и в составе абонентских терминалов. Германский проект SANTANA (**S**mart **ANT**enn**A** **T**ermin**AI**), стартовавший в июле 2003

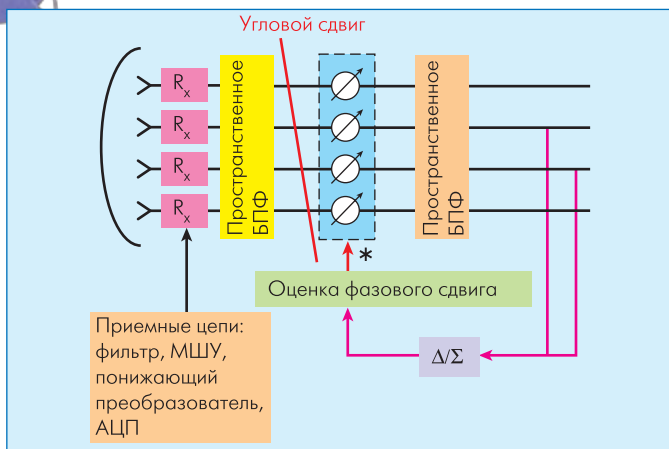


Рис. 11 Концепция реализации FADR [13]

года, направлен на создание абонентской антенны с цифровым формированием лучей для широкополосной спутниковой связи [15]. В проекте участвуют Гамбургский технический университет, Институт коммуникации и навигации, Институт высокочастотной техники, а также компании EADS Astrium, IMST, DLR, INF и VCon. Финансирует проект Министерство образования и исследований Германии (German Ministry for education and research). Цель проекта – разработка демонстратора активной ЦАР Ка-диапазона (20 / 30 ГГц), предназначенной для портативных терминалов. Проект состоит из двух этапов. В ходе первого были разработаны, созданы и исследованы 16-элементные приемные и передающие модули ЦАР.

На втором этапе (SANTANA-2) за счет использования базовых модулей создан демонстратор 4-модульной (64-элементной) приемо-передающей ЦАР. В ходе его испытаний был проведен дуплексный обмен данными между 16-элементной ЦАР и самолетом, летящим на высоте 3 км со скоростью 250 км/ч. При этом была достигнута скорость передачи "вверх" 400 кбит/с (при частоте несущей 30 ГГц, ширине полосы частот 600 кГц и модуляции BPSK) и "вниз" – 28 Мбит/с (при частоте несущей 20 ГГц, ширине полосы частот 18,9 МГц и модуляции QPSK).

Дальнейшие исследования планируется направить на системную интеграцию, в ходе которой предполагается создание 256 (512)-элементной модульной приемо-передающей спутниковой ЦАР. Контракт на производство такой ЦАР был заключен с немецкой фирмой Lewicki Microelectronic. По завершении проекта планируется решить вопросы цифрового формирования многолучевой ДН, независимой адаптации параметров отдельных лучей к изменению условий передачи, сопровождения многочисленных разнотипных подвижных объектов. Универсальность методов цифрового формирования луча позволяет применить отработанные в рамках проекта SANTANA решения также в родственных областях, в частности, дистанционного радиомониторинга Земли, радиолокационной разведки (Space Based RADAR).

В целом, технологии ЦАР в наземных станциях ССС позволяют:

- отслеживать девиации пространственного положения спутника на орбите без механического вращения зеркала антенны наземной станции. Это особенно важно для продления времени работы геостационарных супников, которые после израсходования топлива для корректирующих двигателей начинают дрейфовать в окрестности точки стояния, что не позволяет применять для бесперебойной связи с ними традиционные антенные системы;
- повысить пропускную способность каналов связи за счет снижения потерь при приеме сигналов и увеличения отношения сигнал-шум, достигаемого в результате когерентного накопления сигналов по полотну решетки;
- обеспечить помехоустойчивость связанных каналов в случае возникновения искусственных помех.

Достижения последних десятилетий в технике связи, ознаменовавшие начало 21 века, – это лишь прелюдия к более грандиозным технологическим прорывам. Сейчас невозможно в деталях представить всю масштабность предстоящих изменений в связанных технологиях. Однако ряд тенденций, наметившихся в последние годы, позволяет достаточно уверенно указать наиболее вероятные направления их развития в первой половине 21 века. В этом ряду важное место занимает внедрение в системы мобильных и спутниковых коммуникаций цифровых антенных решеток.

ЛИТЕРАТУРА

8. Mallison M.J., Robson David. Enabling Technologies for the Eurostar Geomobile Satellite. /19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference "Satellite Communications for the new Millennium. Systems, Services and Technologies". 17–20 April 2001. – Toulouse (France), cnes.cborg.net/aiaa-icssc/proceedings/949.pdf.
9. Копик А. Второй мощный спутник для Inmarsat. Запуск Inmarsat 4-F2. – Новости космонавтики, 2005, № 12, www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/276/03.shtml.
10. Lewis Farrugia. Astrium View of Future Needs for Interconnect Complexity of Telecommunications Satellite on-board Digital Signal Processors. – Meeting on "Optical Interconnects for High Throughput On Board Processors" at ESTEC, 9th February 2006, <https://escies.org/GetFile?rsrid=1643>.
11. Toru Takahashi, Yoshihiko Konishi, Shigeru Makino. Development of key technologies for large deployable active phased array antennas. – Solar Power Satellite/Station (SPS) Technical Group Workshop, www.rish.kyoto-u.ac.jp/spstg/SPS2003-10.pdf.
12. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology (quarterly). Special Issue on the Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII), Vol. 50, No. 3/4, September/December 2003, www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol50no3.4.htm.
13. Gerard Caille. Brief overview of adaptive digital beam forming antenna work at Alcatel Space. – 4th COST 284 Management Committee Meeting, 16–18 September, 2003, Berlin, Germany.
14. Гинзбург В. М., Белова И. Н. Расчет параболических антенн. – М.: Сов. радио, 1959.
15. Arne F Jacob. SANTANA. Smart Antenna Terminal. – TU Hamburg-Harburg. DLR-Workshop "Aktive Antennen".

**Новая линейка средств электрозащиты компании "СТР"**

ЗАО "СТР" приступило к серийному выпуску новой линейки модулей кроссовой защиты (МЗК), а также модулей защиты интерфейсов (МЗИ) различного назначения.

Отличительная особенность новых модулей МЗК для защиты одной пары – применение универсального корпуса собственной разработки, не поддерживающего горения. Универсальность корпуса заключается в том, что новые МЗК могут быть изготовлены для плитов различных производителей. Однако компания "СТР" основной упор делает на производство защиты для плитов серии KCS своего давнего стратегического партнера – итальянской компании Belconn.

Основные достоинства новых изделий:

- полностью закрытый корпус, исключающий возможность контакта с токопроводящими частями модуля;
- малые габаритные размеры корпуса, позволяющие не закрывать маркировку плитов серии KCS;
- применение малогабаритных газонаполненных разрядников компании Bourne с улучшенными характеристиками в качестве элемента защиты по напряжению;
- возможность установки второго каскада защиты по напряжению на полупроводниковых элементах, а также светодиодной индикации срабатывания защиты по току;
- удобная маркировка, исключающая возможность неправильного подсоединения модулей.

Важно, что улучшение конструктива новых МЗК не увеличило их стоимости. Также начат выпуск модулей МЗК для за-

щиты 10 пар. Обладая всеми вышеперечисленными достоинствами, данные модули могут дополнительно содержать гнезда для подключения средств контроля и измерений без извлечения МЗК из плитов.

Вторую группу новой продукции составляют модули защиты интерфейсов. Основные серийно выпускаемые изделия предназначены для оборудования с интерфейсами RS-232, RS-485, "токовая петля", со слаботочными сигнальными цепями (в том числе с ТТЛ-уровнями), а также для защиты сетевого оборудования ЛВС.

Основные достоинства данной линейки:

- возможность различного конструктивного исполнения (монтаж на плоскую поверхность, на DIN-рейку, в плит, уличный вариант, одно- и многопарные варианты в одном корпусе);
- гибкость схемотехнических решений в зависимости от требований, предъявляемых защищаемым оборудованием, и характеристик соединительных линий;
- удобство подключения линий с помощью различных соединителей (винтовые клеммники, разъемы типа RJ и др.);
- малые габариты и масса.

Важно отметить, что благодаря вышеперечисленным техническим достоинствам продукции и ряду маркетинговых мероприятий, доля поставок оборудования собственного производства компании "СТР" относительно импортного оборудования значительно возросла.