

Вадим СЛЮСАР

Фазированная антенная решетка системы Thuraya

Особенностью нынешнего этапа развития ССМС (спутниковых систем мобильной связи) стало развертывание региональных систем, которые в отличие от глобальных проектов (Inmarsat, Iridium, GlobalStar) нацелены на обслуживание отдельных районов земной поверхности. Подобные проекты, не столь амбициозные по замыслу, но опирающиеся на новейшие технологии, оказываются более привлекательными с инвестиционной точки зрения, а их разработка под силу не только гигантам корпоративного мира, но и компаниям со сравнительно небольшими капиталами. Примером альтернативного подхода к решению проблем спутниковой связи может служить система Thuraya, введенная в эксплуатацию летом 2001 г. Финансирование ее разработки и ввода в строй, а также последующую эксплуатацию взяла на себя компания Thuraya Satellite Telecommunications (Объединенные Арабские Эмираты), <http://www.thuraya.com/>.

Космический сегмент Thuraya (в переводе с арабского — «Плеяды»), представляющий собой геостационарный спутник Thuraya-1 (рис. 1), размещенный в позиции 44 град. восточной долготы [1], еще в октябре 2000 г. был выведен на околоземную орбиту с известной платформы Sea Launch («Морской старт»). Проект оценивается в 1 млрд. долл. Проектная мощность системы Thuraya рассчитана на обслуживание 1750 тыс. абонентов в регионе, охватывающем территорию примерно между 20 град. западной — 100 град. восточной долготы, 60 град. северной — 2 град. южной широты, где расположены в общей сложности 99 стран Азии, Европы и Африки, в том числе и Украина.

На сегодняшний день система способна обслуживать до 235 тыс. абонентов. Эта цифра обусловлена объемом первоначальной партии мобильных терминалов, изготовлением кото-

рых занимаются фирмы Hughes Network Systems (США) и Ascom (Швейцария). Ориентировочная стоимость аппаратов при поставке непосредственно производителями не превышает 800 долл.

Конструкция пользовательского терминала довольно необычна для традиционных ССМС (рис. 2). Он имеет габариты 14х5х2,5 см при весе 200 г и напоминает скорее малоразмерную телефонную трубку. Существенно, что телефонный аппарат Thuraya рассчитан на двухстандартную связь и может работать в диапазоне GSM 900 МГц, а также в диапазонах спутникового канала (1525–1559 МГц при приеме сигналов и 1626,5–1660,5 МГц при их передаче на борт орбитального комплекса). При этом размер двухчастотной *L-band*-антенны лишь незначительно превышает размер антенны традиционного терминала стандарта GSM, что достигается за счет особой ее упаковки (скрутки в цилиндрическую спираль). Максимальная мощность излучения передатчика мобильного терминала, как и в GSM 900, ограничена величиной 2 Вт. Компактность и низкий уровень излучения удалось обеспечить благодаря ряду принципиально новых для систем спутниковой связи технических решений, реализованных на борту космического аппарата.

Ключевым решением стало использование (впервые для подобного класса задач) приемопередающей

Новое слово в технике спутниковой связи: приемопередающая цифровая антенная решетка, в которой осуществляется цифровое формирование лучей характеристики направленности.

цифровой антенной решетке (ЦАР), в которой выполняется цифровое формирование лучей (ЦФЛ) характеристики направленности (ХН) [1]. При 128 активных дипольных элементах L-диапазона бортовой комплект процессоров обработки сигналов позволяет формировать одновременно 250–300 лучей (в соответствии с числом наземных сот). Цифровое формирование луча (ЦФЛ) – единственная на сегодня технология, позволяющая эффективно реализовать динамическую адаптацию обслуживаемой зоны покрытия на основе оперативного перенацеливания цифровых приемопередающих лучей по наземным ячейкам с целью адекватного реагирования на изменения в нагрузке и оптимизации двунаправленного трафика [1]. Группа лучей, синтезируемая, например, по алгоритмам быстрого преобразования Фурье либо посредством классических процедур дискретного Фурье-анализа, является, по сути, совокупностью «пространственно-частотных фильтров», каждый из которых пропускает строго определенный набор сигналов и подавляет остальные, одновременно принимаемые в широком пространственном секторе как помехи.

Для реализации такого подхода потребовалось существенно пересмотреть традиционные технологические решения, на которых прежде базировалось создание фазированных антенных решеток (ФАР). В отличие от схемотехники последних, в каждом приемном канале ЦАР вместо фазовращателей устанавливаются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), выполняющие многозарядное квантование сигналов по уровню и дискретизацию их во времени. На **рис. 3** приведена типовая схема приемного сегмента ЦАР, предназначенного для установки на космических аппаратах связи [2]. В данном варианте предусмотрено аналоговое формирование в приемных каналах квадратурных составляющих принятых сигналов с оцифровкой каждой из квадратур отдельным АЦП. При этом разводка тактирующих сигналов на все АЦП осуществляется от единого задающего генератора, с тем чтобы все преобразователи срабатывали строго синхронно по раскрытию ЦАР.

Совокупность цифровых отсчетов напряжений многосигнальной смеси через высокоскоростной интерфейс поступает на процессор формирования характеристик направленности, ориентирующий максимумы лучей («вторичных каналов») по координатам центров наземных сот. Тем самым осуществляется первичная пространственная селекция абонентов. Далее полученные отклики вторичных каналов независимо обрабатываются канальными процессорами, выполняющими выделение каналов с переменной полосой пропускания, квадратурно-фазовую демодуляцию сигналов и декодирование сообщений по традиционным стандартам TDMA (Time Division Multiple Access) / FDMA (Frequency Division Multiple Access), используемым для обмена в системе Thuraya.

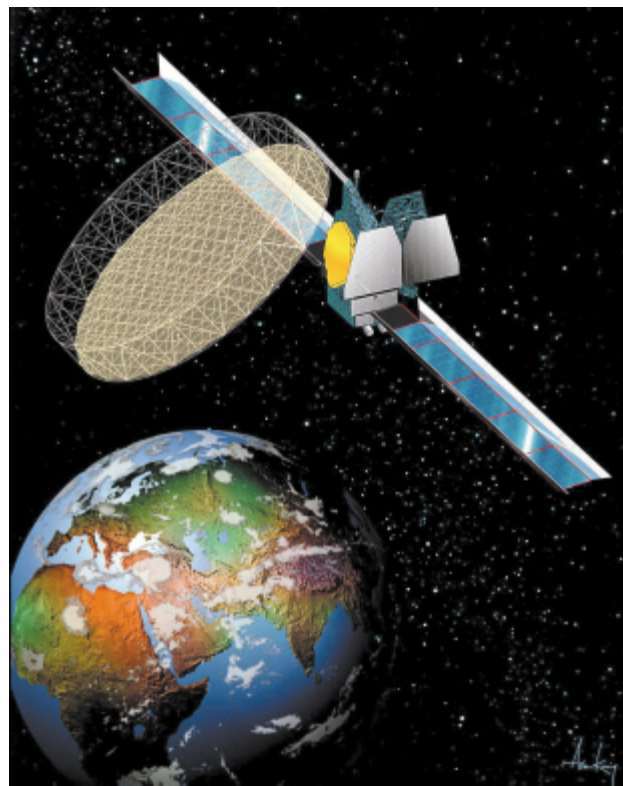


Рис. 1. Thuraya-1 на орбите

Функционирование канальных процессоров отличается от алгоритмов работы обычных базовых станций мобильной связи лишь тем, что отсчеты сигналов поступают не в темпе аналого-цифрового преобразования, а с интервалом, необходимым для выполнения операций ЦФЛ. Для согласования темпов диаграммообразования (сотни килогерц) с периодом дискретизации АЦП (десятьки–сотни мегагерц) обычно применяются

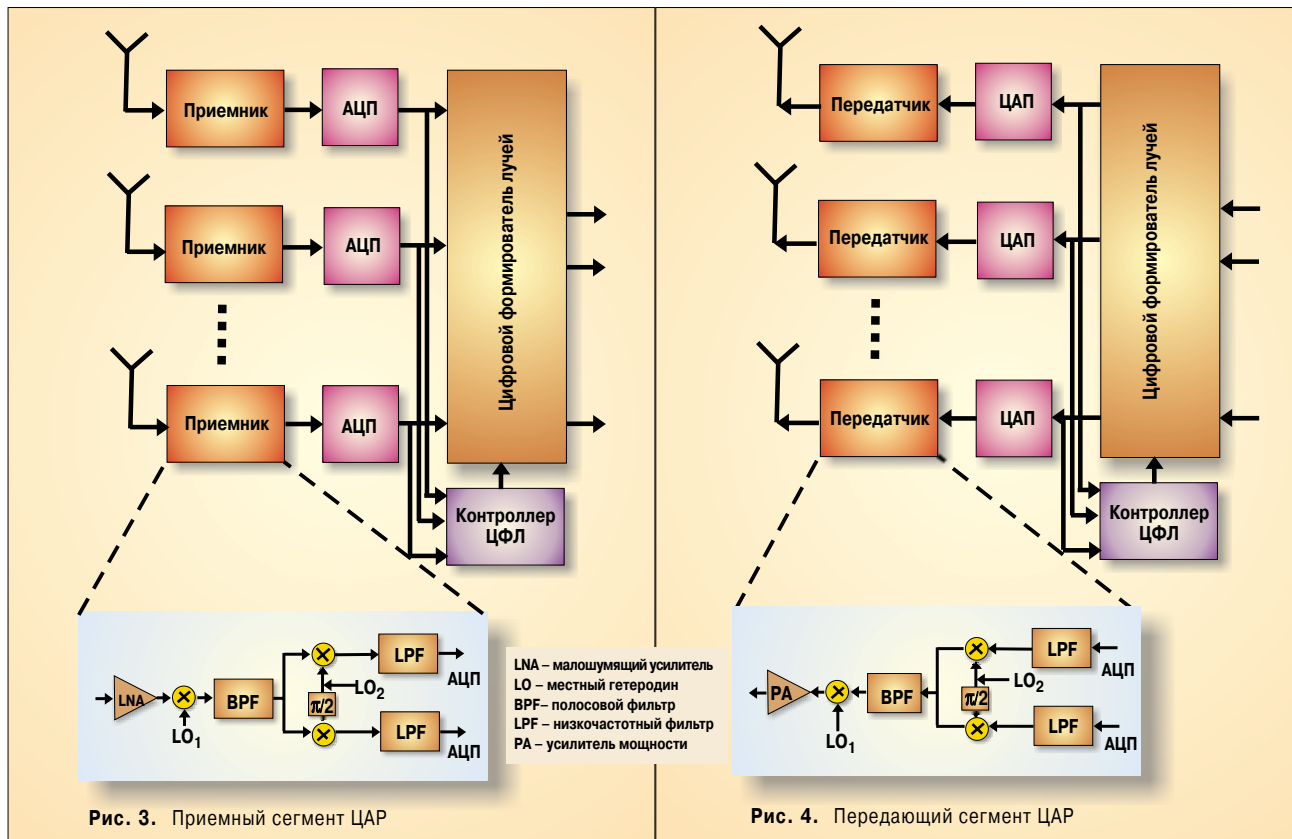
цифровые фильтры, накапливающие в жестко отведенных интервалах времени (стробах) отсчеты сигналов, полученные с выходов АЦП. Помимо прореживания информационного потока без потерь в энергетике, такой принцип обработки позволяет декоррелировать шумы, произвести дополнительную частотную селекцию, повысить отношение сигнал/шум за счет когерентного суммирования напряжений сигнальной смеси. Кстати говоря, сам процесс синтеза лучей путем их взвешенного фазированного суммирования, подобно цифровой фильтрации, сопровождается наращиванием мгновенного динамического диапазона системы (для 128-элементной антенной решетки Thuraya прирост мощности в пределе может составить 10 lg128 дБ), что служит базой для достижения высокой

помехозащитности и качества связи.

Во многом схожие процессы, только в обратном порядке, происходят и при работе ЦАР на передачу. После квадратурно-фазовой модуляции в канальных процессорах сигналы, подлежащие излучению, в цифровом виде подвергаются кодированию по упомянутым стандартам

Рис. 2. Пользовательский терминал системы Thuraya





TDMA/FDMA и далее подаются на процессор ЦФЛ, формирующий цифровой образ результирующего амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля по раскрытию ЦАР, соответствующего заданной пространственной ориентации лу-

чей ХН. Комплексные отсчеты цифровых напряжений сигналов с выхода процессора ЦФЛ подаются на цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), которые, как и АЦП, имеются в каждом цифровом сегменте передающих каналов ЦАР (рис. 4).

После смещения по частоте и усиления по мощности преобразованные в аналоговый вид сигналы ЦАП поступают на питающие зажимы антенных элементов и излучаются в пространство. При работе на общую приемопередающую антенну, что имеет место на борту Thuraya-1, приемный и передающий сегменты подключают к антенным элементам через коммутаторы.

Такая нехитрая схема функционирования ЦАР уже отработана в серийных радиолокационных системах [3], ультразвуковой диагностической технике [4], а также в системах наземной мобильной связи, правда, пока на уровне демонстрационных макетов [5]. Хотя в проектах мобильной связи 4-го поколения присутствие ЦАР на базовых станциях уже предусмотрено в качестве обязательного условия [6] (за рубежом такие антенные решетки часто именуют *smart antenna*, что буквально означает «интеллектуальная антенна»).

К сожалению, пока еще отсутствует достоверная информация о том, в какой степени схемотехника бортовой аппаратуры космического аппарата Thuraya-1 соответствует рассмотренным выше канонам тех-

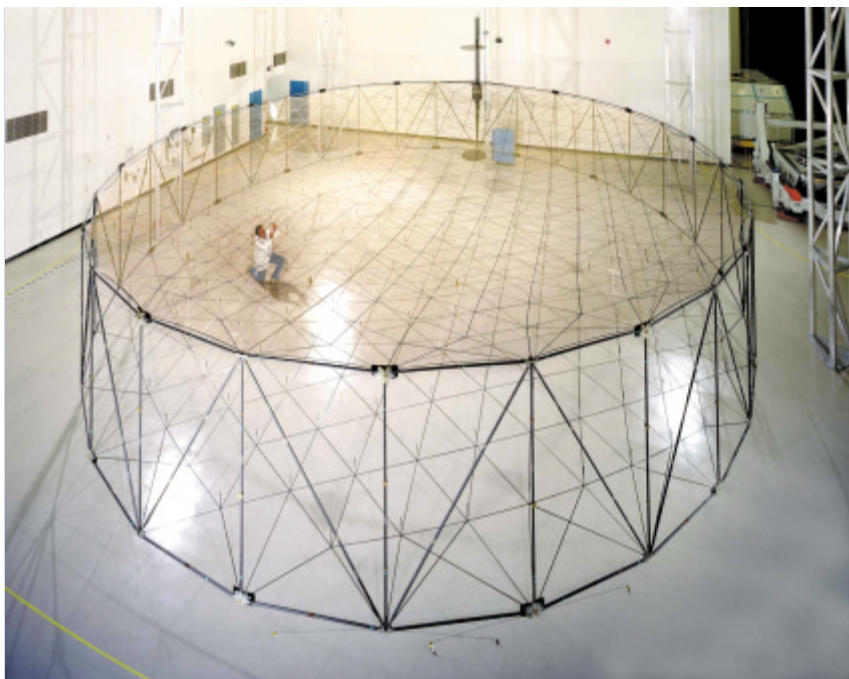


Рис. 5. Приемопередающая антенная решетка

нологии ЦФЛ (*digital beamforming*). Тем не менее однозначная, не допускающая многовариантных толкований, трактовка термина *digital beamforming* специалистами в области обработки сигналов, а также комментарии фирмы Boeing (основного подрядчика — изготовителя спутника) к концепции построения телекоммуникационных космических аппаратов (<http://www.hsc.com/dsp/digiprocessor.pdf>) говорят о приверженности разработчиков Thurga именно к представленным на рис. 3 и 4 схемотехническим решениям. В пользу такого варианта схемной реализации ЦФЛ свидетельствует также сравнительно малое количество (128) антенных элементов решетки (чем их меньше, тем проще осуществить в реальном времени процедуру ЦФЛ), достаточно низкая скорость обмена данными по каналам Земля-спутник, соответствующая темпам цифрового диаграммообразования, и наличие на борту космического аппарата непомерно мощного процессорного модуля обработки сигналов.

Аналогичные технические решения предусмотрены и в других проектах региональных ССМС, и это лишь раз подтверждает, что идеология построения ЦАР достигла стадии технологической готовности для реализации. В частности, подобная концепция многолучевой антенной решетки положена в основу японского проекта квазистационарной системы связи, продвигаемого Mitsubishi Electric [5]. Космическая часть данной системы включает 3 спутника, движущихся по эллиптической орбите с наклоном 45° и апогеем 42 тыс. км. Предполагается установить на каждом спутнике плоскую активную ЦАР S-диапазона (2,6 ГГц), формирующую до 160 узких цифровых лучей, которые покроют всю территорию Японии. Система будет поддерживать до 100 тыс. каналов двухсторонней связи (примерно 5 млн. абонентов). Ожидаемые размеры развернутой ЦАР — 45×45 м, при ее изготовлении планируется использовать кевлароподобный материал толщиной 2 мм с плотностью 300 г/кв.м.

Рассмотрим особенности конструкции антенной решетки Thurga (рис. 5). Ее габариты меньше, чем у японского аналога, — 16×12,25 м [1] (в большинстве сообщений СМИ фигурирует только диаметр — 12,25 м). Несущая конструкция (далее *рефлектор* [7]) изготовлена компанией TRW Astro Aerospace по запатентованной технологии AstroMesh (патент США № 5990851 от 23 ноября 1999 г. [7]). Это громоздкое, но достаточно прочное и легкое сооружение (антенная система весит всего 78 кг), что достигается за счет использования теплоустойчивого графито-композитного материала.

Благодаря трубчатой конструкции с шарнирно-троссовыми сочленениями антенная решетка при подготовке спутника к запуску укладывалась в компактный модуль высотой 3,8 м и диаметром 1,3 м. После выхода аппарата на расчетную орбиту рефлектор по команде с Земли был развернут до своих штатных размеров с помощью сжатого газа, заполнившего контуроформирующий



МОБИЛЬНАЯ СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ

единый тариф в 99 странах мира



0.60

у.е./мин.*

* - стоимость одной минуты разговора между абонентами спутниковой системы связи "Турая".
Все входящие звонки для абонентов "Турая" - бесплатно.

Компания "Турая" предоставляет услуги мобильной спутниковой связи в любой точке Украины и еще 98 стран мира. Если Вам нужна надежная качественная и недорогая связь на обширных территориях, с отдаленными филиалами, сотрудниками и транспортными средствами, ваш выбор - "Турая".

www.thuraya.com.ua

Цена указана с учетом НДС,
лицензия Госкомсвязи АА № 009550

тел. (044) 457-77-74

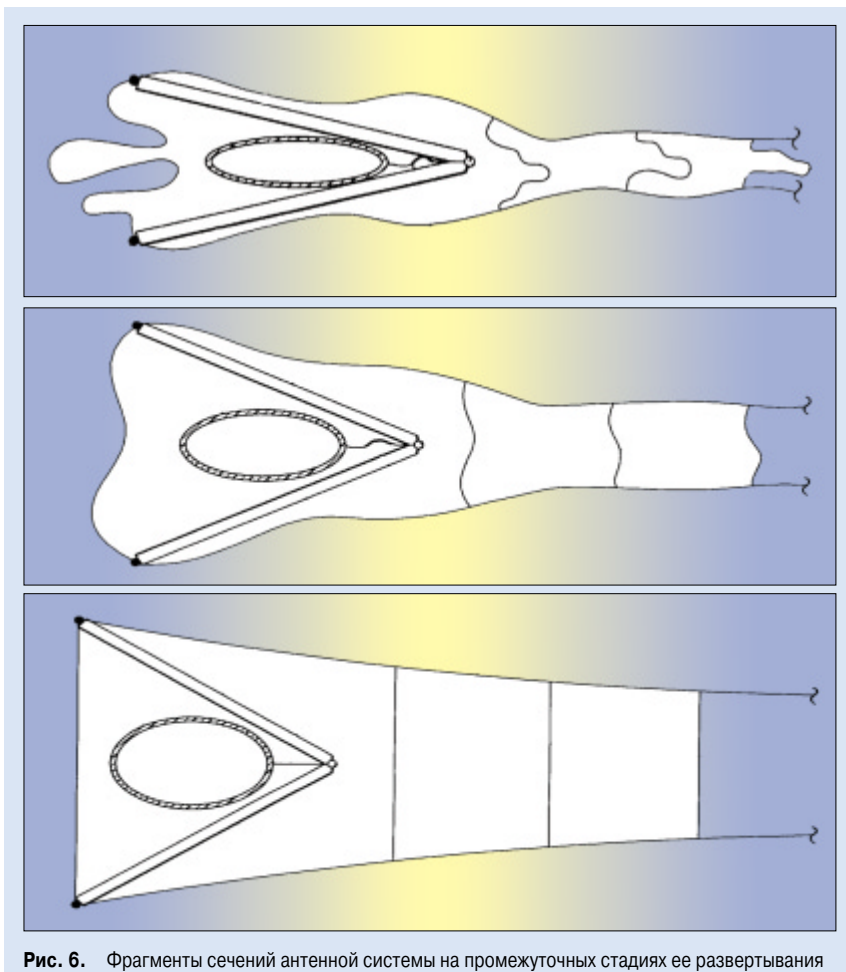


Рис. 6. Фрагменты сечений антенной системы на промежуточных стадиях ее развертывания

тороидальный баллон из эластичного кевлароподобного материала. На рис. 6 [7] показаны различные фрагменты сечений антенной системы на промежуточных стадиях ее развертывания. Особенностью технологии AstroMesh специалисты считают полное отсутствие влияния температурных вариаций объема и формы газонаполненного баллона на геометрию развернутого рефлектора, что позволяет избежать ошибок формирования луча, вызванных случайными деформациями полотна решетки.

Таким образом, технические аспекты японского проекта и опередившего его Thugaа во многом схожи, что подтверждает общую тенденцию превращения ЦФЛ в базовую технологию для региональных систем спутниковой связи.

К аналогичным решениям, в плане максимального использования схмотехники ЦАР, в последнее время тяготеют и российские специалисты: проект «Садко» [8] компании «Кросна» как нельзя лучше вписывается в рамки возможно-

стей сравнительно недорогих и доступных на мировом рынке модулей цифровой обработки сигналов [9]. Действительно, согласно [8], количество лучей, формируемых антенной спутника «Садко», составит 30–40, а информация планируется передавать со скоростью 9,6 Кбит/с вверх и до 96 Кбит/с вниз. По данным того же источника, компания «Кросна» пока ориентируется на разработанную канадской фирмой SPAR многолучевую антенную систему, в которой осуществляется аналоговое формирование лучей с помощью диаграммообразующих матриц фазовращателей. Однако даже при таком построении вся последующая обработка с оцифровкой выходных сигналов каждого из лучей может базироваться на принципах работы ЦАР (рис. 3, 4). По сути, такая схмотехника является гибридным решением и не позволяет осуществить адаптивное перенацеливание отдельных лучей столь же эффективно, как и в случае ЦФЛ.

Литература

1. Cary B. Ziter. Boeing and IBM set new record with world's most powerful satellite digital communications processor (http://www.hughespace.com/hsc_pressreleases/01_07_11_ibm.html).
2. Raymond L. Pichholtz. How to Grow «Bandwidth» for Wireless Communications. The George Washington University USA. Queens University 20th Biennial Symposium. May 29, 2000 (<http://www.ece.queensu.ca/dept/pichholtz.pdf>).
3. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации // Электроника: НТБ. 2001. № 3. С. 42–46.
4. Слюсар В. Ультразвуковая техника на пороге третьего тысячелетия // Электроника: НТБ. 1999. № 5. С. 50–53.
5. Слюсар В.И. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня // Электроника: НТБ. 2001. № 1. С. 6–12.
6. The Path to 4G Mobile // Communications Week International. Issue 260, 5 March 2001. P. 16–17.
7. Патент США № 5990851, H01Q 15/20. Space deployable antenna structure tensioned by hinged spreader-standoff elements distributed around inflatable hoop. Nov. 23, 1999.
8. Колобакин В. Система мобильной связи «Садко» // Телеспутник. 2001. № 8.
9. Слюсар В.И. Схмотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2002. № 1. С. 2–8.
10. <http://www.chips.ibm.com/products/asics/>.
11. Липатов А.А., Федорова Т.М., Скорик Е.Т. Комплексное использование геостационарного спутника подвижной связи нового поколения Thugaа // Материалы 11-й международной крымской микроволновой конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (СГМiCo'2001), 10–14 сентября 2001 г.
12. <http://www.alphatelecom.ru/overview.htm>.

Вадим СЛЮСАР,

д-р техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского управления Центрального НИИ вооружения и военной техники Вооруженных сил Украины