

# Проблемы при разработке и развертывании наземных систем в Ка-диапазоне

*Фернандо Носедал, кандидат наук*

**Компания General Dynamics Satcom Technologies**

**Алматы  
Август 2012 года**

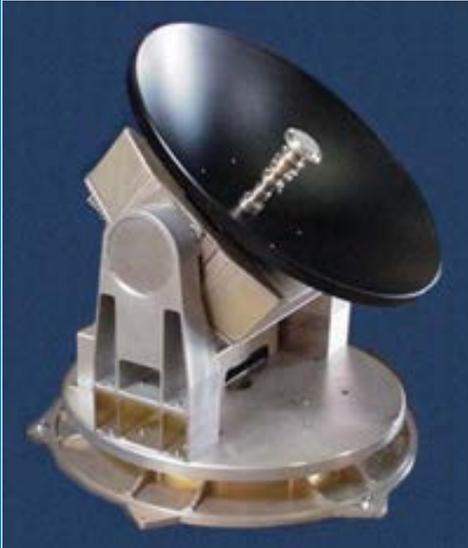


# Содержание



- Общие сведения
- Краткие сведения о поставленных антеннах
- Проблемы, связанные со структурой и поверхностью
- Наведение и слежение
- Влияние температуры
- Примеры развернутых систем

# Общие сведения: Антенны в Ка-диапазоне



- Имеются антенны диаметром от 0,67 м до 18,4 м
- Технические проблемы возрастают с увеличением диаметра
- Серии антенн VSAT, с ограниченным вращением (LM), вращающихся (FM) и подвижной спутниковой связи (SOTM)
- Применения: Телеметрия, слежение и управление (TT&C), шлюзы, линии вверх для непосредственного приема (DTH), терминалы VSAT (широкополосные), приемники DTH, подвижная связь



# Продажи продуктов VSAT в Ka-диапазоне

<u>Размер антенны</u>	<u>Количество продаж</u>	<u>Клиентская база</u>
0,67 м	< 100	Широкополосная связь – США
0,74 м	560 000	Широкополосная связь – США и Европа
0,89 м	< 100	Предприятия – США
0,98 м	14 000	Широкополосная связь и предприятия – США и Европа
1,2 м	3 000	Предприятия – в мире
1,8 м	100	Предприятия – в мире
2,4 м	< 100	Предприятия – в мире

# Доставка 8–9 м/13 м/18 м Ka/DBS (прямое вещание)

Антенны GD-SJ, развернутые после 2005 года

Описание	Размер антенны	Полоса частот	Количество
Разбивка по апертуре	9,2 м	DBS/Ku-диапазон/Ka-диапазон	<b>77</b>
	13,2 м	DBS/Ku-диапазон/Ka-диапазон	<b>39</b>
	18 м	DBS/Ku-диапазон/Ka-диапазон	<b>12</b>
Разбивка по полосе	Все	Ku-диапазон/DBS/зарезерв. полоса	<b>40</b>
	Все	Ka-диапазон	<b>88</b>
Разбивка Ka-диапазона по апертуре	9,2 м	Ka-диапазон	<b>61</b>
	13,2 м	Ka-диапазон	<b>15</b>
	18 м	Ka-диапазон	<b>12</b>
Сводная информация	9,2 м/13,2 м/18 м	DBS/Ku-диапазон/Ka-диапазон	<b>128</b>

# Технические проблемы в Ka-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы
Суточное тепловое воздействие	Колебания температуры и солнечного излучения приводят к перепаду температур в структуре антенны → уменьшение усиления и ошибки наведения.	<p>Конструкционные материалы и расчет конструкции.</p> <p><u>Материал</u>: Единообразие и наименьший коэффициент теплового расширения. Сталь лучше алюминия.</p> <p><u>Конструкция</u>: FEA (анализ методом конечных элементов) термической модели. Резервная структура (BUS) с высоким соотношением жесткость/вес. BUS для максимального уменьшения теплового воздействия.</p> <p>Использование <u>противовесов</u> позволяет/дает возможность:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• балансировать нагрузки на конструкцию;</li> <li>• увеличить срок службы исполнительного механизма угла места;</li> <li>• сгладить вращение угла места;</li> <li>• облегчить и сделать более безопасным перемещение исполнительного механизма;</li> <li>• стальной отражатель.</li> </ul>
Требование в отношении точности отражателя на поверхности	Точность на поверхности в пределах 3% длины волны. При 30 ГГц требуемая точность на поверхности равна отклонению на 0,012 дюйма (0,3 мм) от идеальной поверхности, включая регулировку, тепловое излучение, деформацию под воздействием ветра и гравитацию.	<p>Изготовление качественных панелей и вспомогательных отражателей, а также надежность. Точность поверхности панели отражателя установлена на уровне 0,003 дюйма (76 микронов) (среднеквадратичное значение).</p> <p>Для антенн с большой апертурой для правильной регулировки и проверки установки панели используются методы фотограмметрии. Как правило, панели регулируются по рабочему углу места в пределах 0,003 дюйма (среднеквадратичное значение).</p>

# Проблемы в Ка-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы						
Защита от обледенения	Системы подачи горячего воздуха могут приводить к большим потерям в усилении антенны (до 6 дБ, если конструкция не является оптимальной). Необходимо контролировать тепло применительно к резервной структуре отражателя, которое может приводить к расфокусировке (движения вспомогательного отражателя) и ухудшению среднеквадратичных показателей отражателя. Блокирование резервной структуры приводит к перепадам тепла, даже если система защиты от обледенения неактивна.	<p>Точный контроль температуры противообледенительной вентиляционной камеры для обеспечения того, чтобы на поверхность отражателя поступало достаточно тепла и при этом максимально уменьшалось тепловое воздействие усиления антенны.</p> <p>Конструкция основана на минимальном тепловом расширении структуры.</p> <p>Перепады температур контролируются с помощью вентиляторов и систем распределения тепла в вентиляционной камере.</p> <p>Результаты показывают ухудшения усиления в контролируемом Ка-диапазоне на:</p> <table> <tr> <td>9,2 м</td> <td>0,60 дБ</td> </tr> <tr> <td>13,2 м</td> <td>0,75 дБ</td> </tr> <tr> <td>18,2 м</td> <td>1,00 дБ</td> </tr> </table>	9,2 м	0,60 дБ	13,2 м	0,75 дБ	18,2 м	1,00 дБ
9,2 м	0,60 дБ							
13,2 м	0,75 дБ							
18,2 м	1,00 дБ							
Механическая точность	Качение азимута, механическая отдача, стабильность антенны.	Использование качественных механических компонентов от известных поставщиков, при уделении необходимого внимания жесткости редукторов, кручению кодеров, проверке отдельных компонентов и строгому контролю качества.						

# Работа в Ка-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы
Наведение антенны	<p>Узкий луч антенны в Ка-диапазоне приводит к необходимости очень точного слежения в абсолютных угловых градусах, особенно в условиях ветра.</p> <p>Разновидности профиля показателей преломления будут отличаться от обычного экспоненциального затухания. Это приводит к преломлению, рассеянию и отражению луча антенны.</p> <p>При низких и высоких углах места на наведение антенны влияет деформация гравитационной конструкции.</p>	<p>Точная структура, которая обеспечивает жесткость конструкции при ветре, качественные механические компоненты и низкое тепловое воздействие. Использование сервопривода антенны с системами позиционирования с высокой точностью и высоким разрешением.</p> <p>Решающее значение для уменьшения ошибок наведения имеет надлежащая механическая регулировка, которая требует внимания и мастерства при установке на местах.</p> <p>Системы управления антенной могут поддерживаться различными моделями, которые используются для оценки поправки на рефракцию.</p> <p>Для космической съемки требуются точное и современное компьютерное слежение с двумя линейными элементами (TL) (слежение NORAD).</p> <p>Воздействие гравитационного искажения уменьшается с помощью надлежащей калибровки и компенсационных таблиц в системе слежения.</p>
Слежение антенны	<p>Узкий луч антенны в Ка-диапазоне приводит к необходимости очень точного слежения в абсолютных угловых градусах, особенно в условиях ветра.</p>	<p>Использование надлежащей системы слежения. Общее эмпирическое правило в Ка-диапазоне:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Диаметр &lt; 2,4 м: Как правило, слежение не требуется</li> <li>– Диаметр &lt; 8 м: Steptrack/Optrack</li> <li>– Диаметр &gt; 8 м: Одноимпульсное слежение</li> </ul> <p>Жесткая конструкция с контролем точности антенны</p>

# Работа в Ka-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы
Дифракция и мерцание под малыми углами	<p>Ухудшающее воздействие на стабильность сигнала и наведение антенны при низких углах места.</p> <p>В высоких широтах (углы места &lt; 5°) сильное замирание вызывается мерцанием. Может достигать 10 дБ.</p>	<p>Усовершенствованные модели коррекции дифракции и программы слежения антенны.</p> <p>Разнесенные станции, расположенные не менее чем за 10 км от основной станции.</p>
Ограничения по мощности для усилителей высокой мощности (НРА)	Мощность НРА в Ka-диапазоне ограничивается технологией НРА.	Сочетание фаз НРА: Satcom в течение многих лет успешно сочетает фазы НРА в Ka-диапазоне и обеспечивает надежные мощные системы на линии вверх.
Высокая стоимость и надежность НРА	<p>Стоимость НРА является высокой, и в связи с НРА могут возникать вопросы, касающиеся надежности, например ограниченный срок службы ламп бегущей волны (TWT).</p> <p>Вопрос: каково усиление антенны по отношению к размеру НРА?</p>	<p>Использование антенн с большой апертурой обеспечивает дополнительное усиление (э.и.и.м. и G/T) и уменьшает количество НРА. Например, переход от антенн размером 9,2 м к антеннам в 13,2 м в Ka-диапазоне имеет следующие преимущества:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) При переходе от 4 к 2 НРА уменьшение цены примерно равно увеличению цены при переходе от антенны размером 9,2 м к антенне в 13,2 м</li> <li>2) Усиление при приеме и G/T на 3 дБ выше</li> <li>3) Механическое усиление является более надежным, чем мощность электронного усилителя на ЛБВ (TWTA)</li> <li>4) Усиление (антенны) 3 дБ TX по сравнению с усилением 2,5 дБ TX (фазовая гребенчатая решетка)</li> <li>5) Более простая и более надежная архитектура системы</li> <li>6) Более низкие требования к системе охлаждения концентратора</li> </ol>

# Работа в Ka-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы
Потери в волноводе TX в Ka-диапазоне	Потери в волноводе между НРА выходным фланцем и входным фланцем антенны очень большие в волноводах WR34 и WR28. В Ka-диапазоне типичные потери в волноводе составляют около 0,5 дБ на метр.	Использование L-диапазона для линий между устройствами (IFL) и блокирование перехода в Ka-диапазон в концентраторе.  Монтирование BUC и НРАs в концентраторе антенны как можно ближе к облучателю антенны.  Крупный концентратор с регулируемыми внешними условиями для обеспечения надежной работы НРА.
Замирание в дожде и управление мощностью на линии вверх (UPC)	Поскольку замирание в дожде может быть весьма существенным (> 30 дБ), в Ka-диапазоне управление мощностью и стабильность на линии вверх становятся все более важными.	Использование большой области значений UPC путем обеспечения максимальной э.и.и.м. в условиях замирания и высокого соотношения C/No в условиях ясного неба (области значений UPC 20+ дБ).  Введение алгоритма M&C UPC, который измеряет уровень сигнала линии вниз от приемника слежения для управления корректировкой ослабления блочного преобразователя вверх (BUC).  Для систем с высокими требованиями к готовности реализуются разнесенные станции (типичное разнесение > 10 км). Готовность может существенно повыситься в результате статистической независимости турбулентных воздушных масс на трассе сигнала.

# Развертывание в Ka-диапазоне

Проблема	Описание	Уменьшение проблемы
Воздействие обтекателя	В Ka-диапазоне потери сигнала и ухудшение G/T являются значительными (до 3 дБ).	При возможности, избегать использования обтекателей с антенной, качество которой измеряется снаружи. Анализ и исследования в области оптимизации для использования обтекателей в Ka-диапазоне.
Тестирование диапазона действия антенны	В Ka-диапазоне тестировать усиление антенны в дальней зоне сложно для антенн с большой апертурой (требуется до 40 км).	Для больших антенн тестирование диапазона нецелесообразно. Этот вопрос можно легче решить с помощью обеспечения точного изготовления воспроизводимых панелей отражателей, тщательных измерений точности поверхности в заводских условиях и фотограмметрии для регулировки панели на месте. Этот процесс хорошо себя зарекомендовал и давно успешно применяется.
Стабильность конструкции НРА	Для усилителей в Ka-диапазоне все еще требуются длительное конструирование и циклы доводки.	Тесное сотрудничество между проектировщиками и производителями. Подробные специальные знания поставщиков в отношении реализации высоконадежных систем НРА в Ka-диапазоне.
Фокусировка антенны	Регулировка фокуса антенны является весьма чувствительной, особенно для больших антенн.	Фотограмметрия и компьютерные алгоритмы помогают в процессе регулировки антенны, наряду с обученным и опытным техническим персоналом станции.
Тестирование РЧ антенн	G/T, усиление антенны и диаграммы направленности антенны тестировать сложно в связи со стабильностью сигнала, особенно при низких углах места.	Исправления с помощью специального программного обеспечения позволяют регистрировать стабильное усиление и диаграммы направленности в присутствии нестабильных эталонных сигналов.

# Системы антенн в Ka-диапазоне

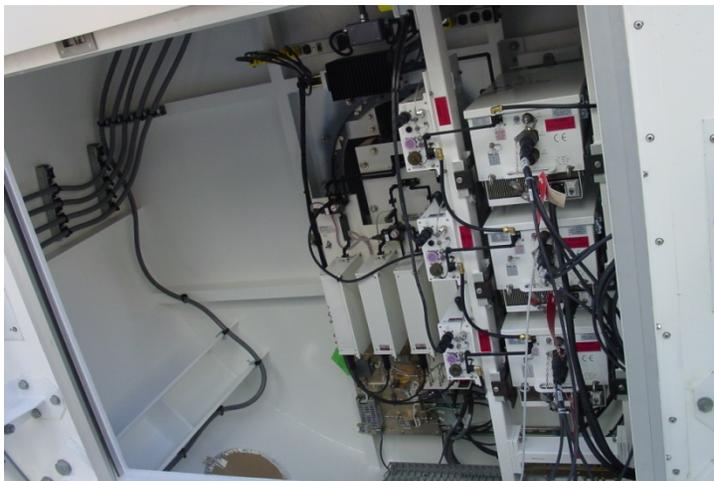


- Проекты антенн
  - 18 м FMA (MUOS)
  - 13 м FMA & LMA
  - 9 м LMA
  - 8 м LMA
  - 5,5 м LMA
- Диапазоны частот
  - 17,7–21,2 ГГц RX
  - 27,5–31,0 ГГц TX
  - Специальные полосы
- Пример пользователей
  - DIRECTV
  - Echostar
  - MUOS (член группы GDC4S)
  - ICO
  - Spaceways
  - Telesat
  - KoreaSat
  - Avanti (Соединенное Королевство)
  - Intelsat (США, Австралия, Индия)
  - Astrium (станции TT&C YahSat)
  - Армия США (RHN)
  - SES Astra
  - SED
  - INMARSAT
  - Loral

# Ка-диапазон для непосредственного приема (DTH)



- Антенны 13 м и 9 м с ограниченным вращением
- Соответствует требованиям ФКС и МСЭ
- Установлены на различных станциях в США
- Укомплектованные станции DTH линии вверх
  - Все электронные средства на линии вверх встроены в концентратор
  - Платформа легкого доступа

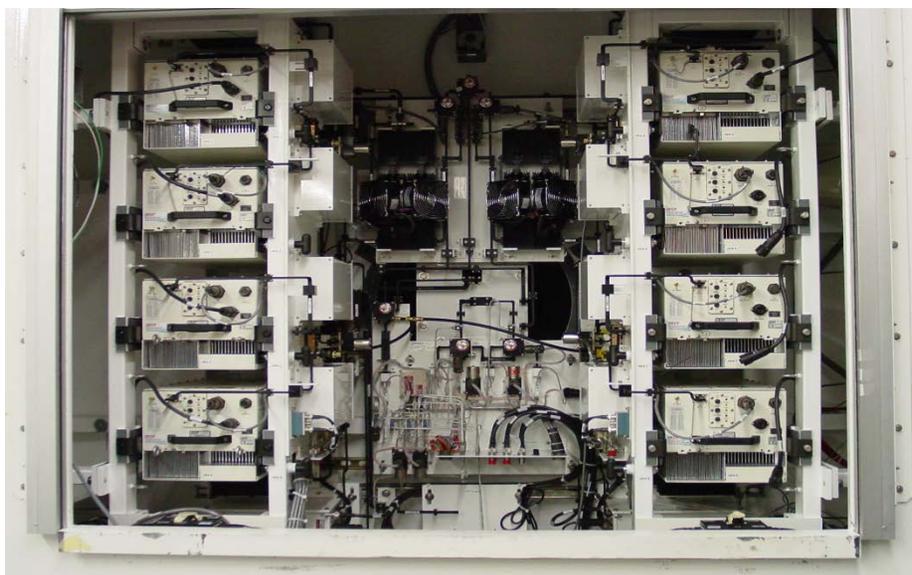


# Антенные системы: класс антенн 8/9 м



# Системы антенных концентраторов

## Класс антенн 9/13 м – Комплектация концентратора



# Показатели э.и.и.м. типовых систем

э.и.и.м. типовых систем @ 30 ГГц (пиковое значение 500 Вт/350 Вт CW НРА)

Тип антенны	Кол-во НРА на POL	НРА до потерь в облучателе (дБ) См. Примечание 1	э.и.и.м. на POL (насыщенный, 350 Вт) дБВт	э.и.и.м. на POL (линейный, дБ ОВО) дБВт
6,3 м	1	-0,75	86,7	84,3
8,1 м	1	-0,75	88,8	86,4
9,2 м	1	-0,75	90,0	87,6
9,2 м (2-сторонняя фаза, комбинированная)	2	-1,40	92,4	90,0
9,2 м (4-сторонняя фаза, комбинированная)	4	-2,00	94,7	92,3
13,2 м	1	-0,75	93,0	90,6
13,2 м (2-сторонняя фаза, комбинированная)	2	-1,40	95,4	93,0
13,2 м (4-сторонняя фаза, комбинированная)	4	-2,00	97,7	95,3

Примечание 1. – Потери включают общие потери от НРА до входного фланца, включая отрезок W/G, плюс один РЧ коммутатор и один соединитель (и потери на объединение фаз для применимых случаев, изложенных выше).

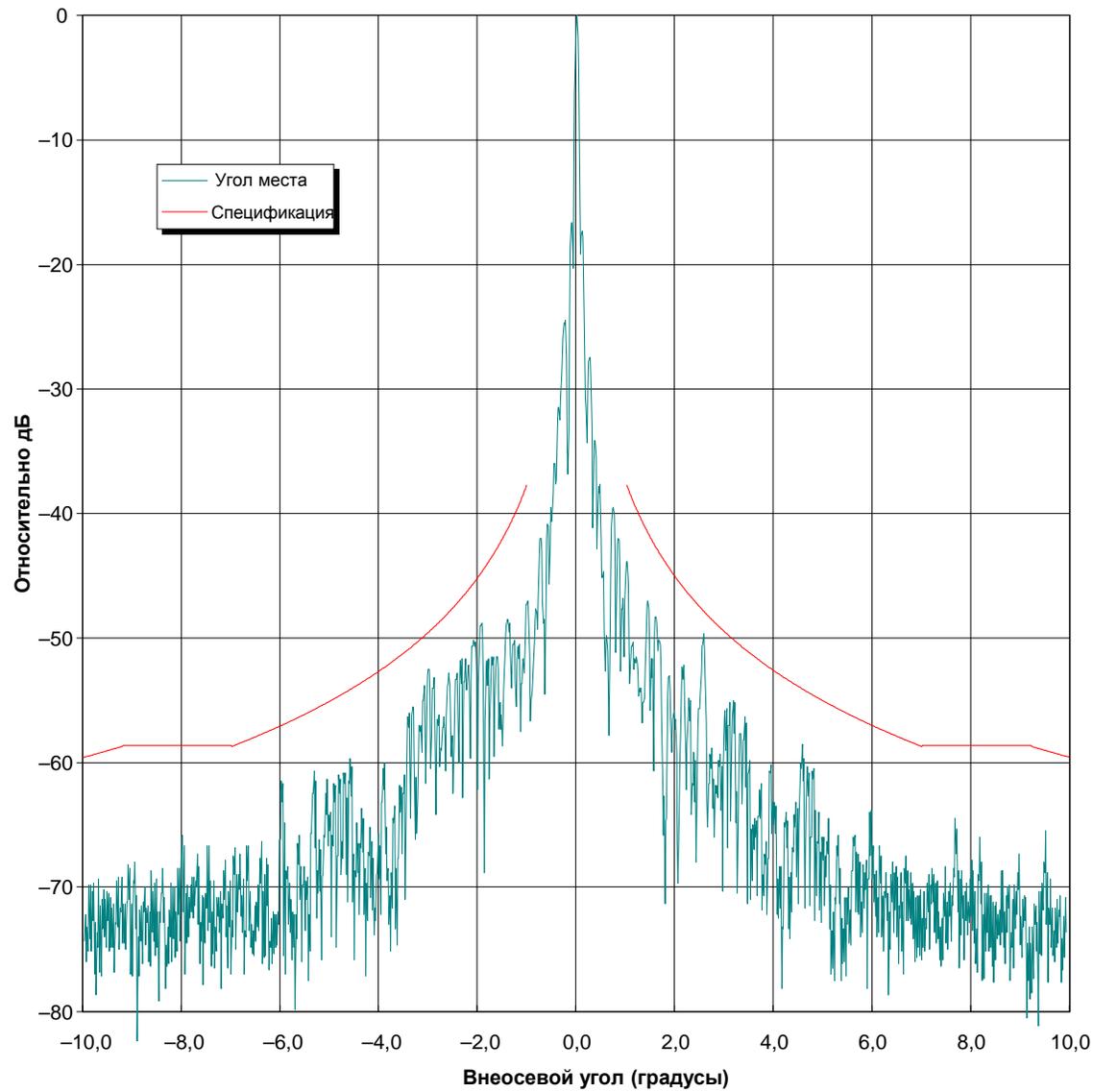
# Типовая схема передачи: угол места

<b>Станция клиента</b>	
Спутник	
	<b>Передача</b>
Ось	<b>УГОЛ МЕСТА</b>
Поляризация	<b>ЛНСР</b>
Сечение диаграммы направленности	<b>20,0°</b>
Спецификация	<b>29-25logθ (1° &lt; θ &lt; 7°)</b>
	<b>+8 дБи (7° &lt; θ &lt; 9,2°)</b>
	<b>32-25logθ (9,2° &lt; θ &lt; 48°)</b>

Угол места= 45,9°  
Частота= 29743,750 МГц  
λ= 0,010 метра  
Диаметр 9,20 метра  
Усиление= 66,6 дБ

Настройки анализатора спектра		
RBW	30	Гц
VBW	1	Гц
Развертка	250,0	секунд
Затухание	0	дБ
Эталонный уровень	-50,6	дБм

Дата проверки: 21 июля 2007 года  
Проверено:



# Земные станции телеметрии, слежения и управления (TT&C) (Программа MUOS)



Вращающиеся антенны 18,4 м  
Объединенные в сеть M&C  
TT&C и WCDMA  
Геосинхронные орбиты  
Функциональные  
возможности IOT

# Опыт по комплектации концентратора

- Внешние условия концентратора антенны полностью регулируются и контролируются.
- Пространство концентратора полностью насыщено для эффективного поддержания как можно более стабильной температуры корпуса, а также недопущения перегрева или переохлаждения структуры антенны.
- Комплектация концентратора включает полную заводскую комплектацию всего электронного оборудования.
- В установках концентраторов используются, как правило, направляющие для оборудования, а также механизмы для перемещения тяжестей для более легкого и безопасного извлечения НРА.

# Воспроизводимые результаты

- История показывает, что характеристики антенны воспроизводятся с помощью применения следующих процессов:
  - Все системы проходят этапы строгого заводского тестирования, специализированного монтажа, регулировки и тестирования на месте.
  - Все проверки осуществляются в соответствии с процедурам, указанными в рабочих чертежах, под строгим документируемым контролем.
  - Клиентам рекомендуется засвидетельствовать все приемо-сдаточные испытания.
  - Следует официально направлять клиентам выпущенные письменные отчеты о проверке/наборы данных для всех приемо-сдаточных испытаний.

# Воспроизводимые результаты

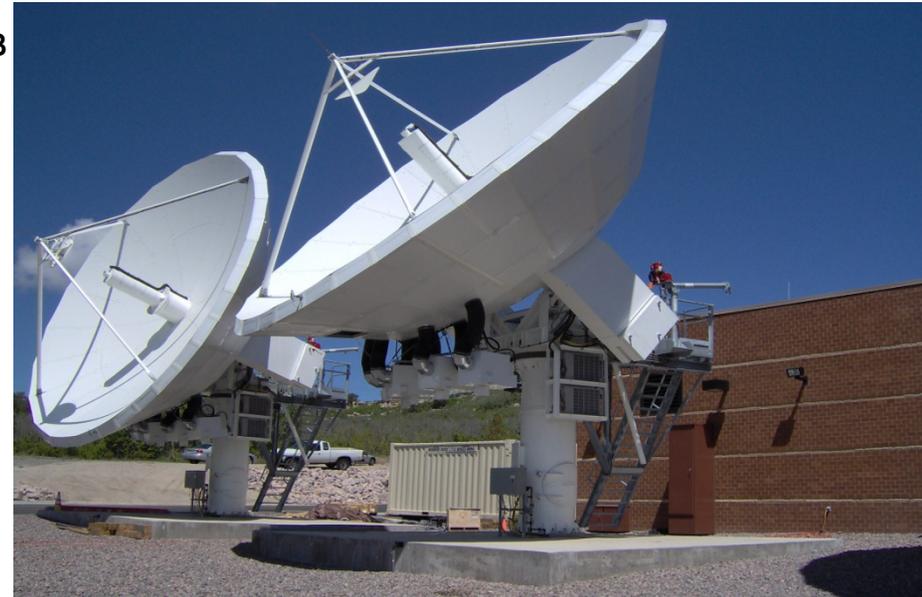
- Полностью успешная история индивидуального тестирования антенн в Ка-диапазоне на местах; проверка диапазона действия антенны, как правило, не требуется.
- Успешный процесс: полная заводская проверка облучателя, тщательное изготовление панели/вспомогательного отражателя, фотограмметрия станции для регулировки отражателя.

# Система кондиционирования воздуха в концентраторе

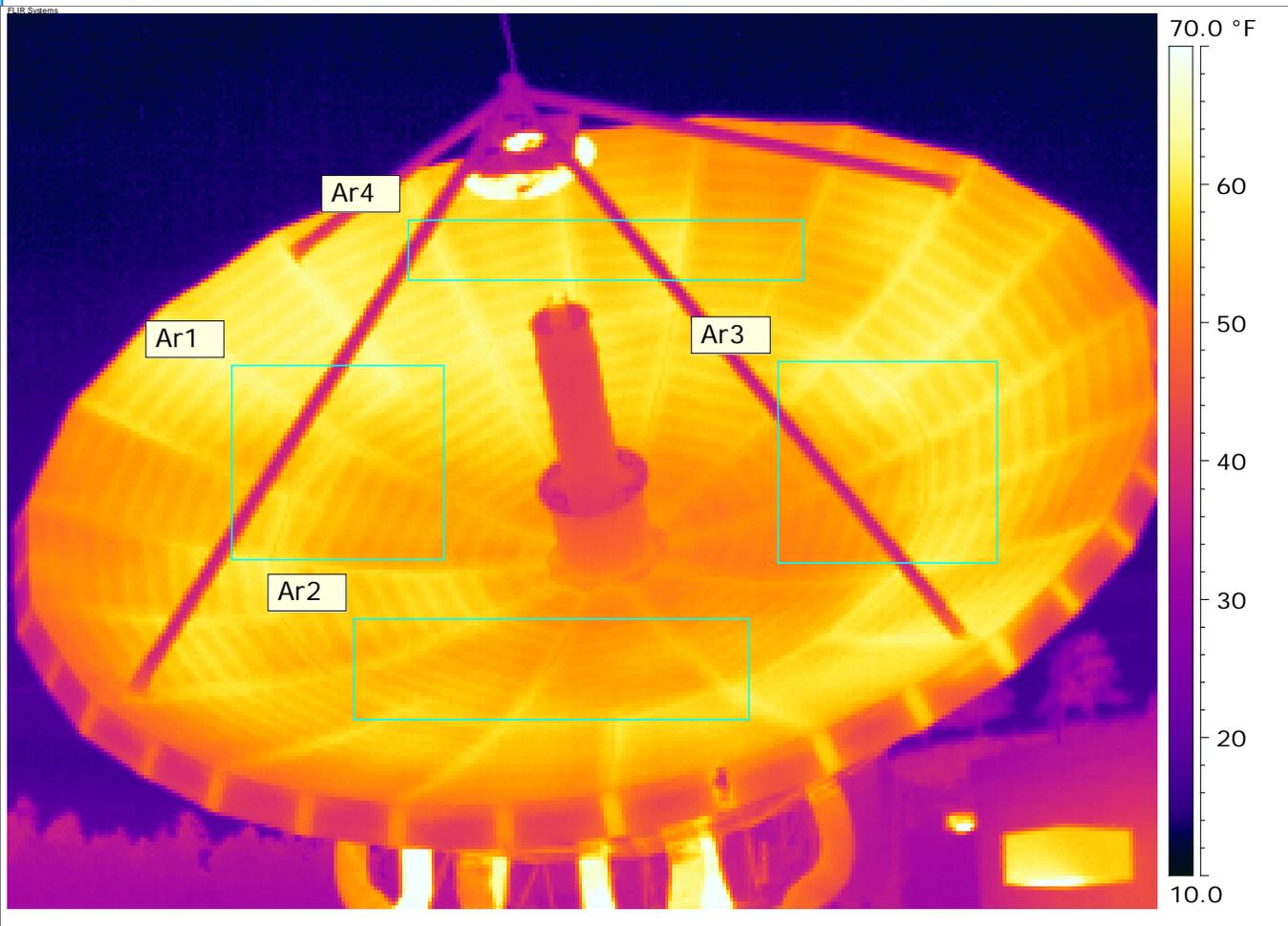
- Две (2) идентичные установки кондиционирования воздуха, размер которых позволяет независимо охлаждать помещения соответствующего объема при работе в полную мощность и которые спроектированы для одновременной работы для обеспечения полной избыточности "1 + 1".
- Интерфейс для контроля состояния установок.
- В системе кондиционирования воздуха в центре концентратора используются установки из двух частей – испарительная установка монтируется на стороне рычагов противовеса, при этом воздух подается по трубе в центр концентратора, а конденсаторная установка монтируется на пристроенной платформе.
- Для подачи воздуха используется жесткий круглый металлический воздуховод с теплоизоляцией, который позволяет полностью охватить всю антенну. Внутри корпуса используется изоляция толщиной в 1 дюйм.

# Защита от обледенения (противообледенительные устройства)

- Подтверждено, что противообледенительные конструкции ограничивают ухудшение сигналов TX и RX до менее 0,75 дБ
- Противообледенительные устройства обеспечиваются для:
  - Поверхности отражателя антенны
    - Система подачи горячего воздуха, в которой используются установки с нагревателем/вентилятором, работающие на природном газе, а горячий воздух циркулирует в вентиляционной камере
  - Поверхности вспомогательного отражателя
    - Нагреватели с электросопротивлением включаются в структуру вспомогательного отражателя
  - Окна апертуры облучателя
    - Система подачи горячего воздуха, в которой используется часть горячего воздуха из вентиляционной камеры отражателя



# Фотоизмерения в инфракрасной области спектра



После двух часов:

Параметры объекта	Значение
Излучательная способность	0,90
Атмосферная температура	34,0 °F
Обозначение	Значение
Ar1: Среднее значение	56,3 °F
Ar2: Среднее значение	55,8 °F
Ar3: Среднее значение	56,3 °F
Ar4: Среднее значение	56,7 °F

# СПАСИБО!



Фернандо Носедал

[fernando.nocedal@gdsatcom.com](mailto:fernando.nocedal@gdsatcom.com)

[www.gdsatcom.com](http://www.gdsatcom.com)

