

УДК 520.2.03, 520.27

## **КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 ПО ГСЗ**

**В. Б. Хайкин, М. К. Лебедев, Н. Н. Бурсов, А. А. Стороженко**  
**Специальная астрофизическая обсерватория РАН**

Статья получена 29 июня 2015 г.

**Аннотация.** В статье предложены способы контроля характеристик радиотелескопа РАТАН-600 по геостационарным спутникам Земли. Приводятся результаты измерений двумерных диаграмм направленности и фокальных пятен, эффективности работы отражающих элементов и групп элементов радиотелескопа, измеренные характеристики сравниваются с модельными. Рассмотрен способ оценки параметров эффективности антенны по измеренным, расчетным и аппроксимированным характеристикам, дается оценка достижимой точности в допустимой области измерений. Полученные результаты показывают высокую информативность и эффективность метода контроля характеристик радиотелескопа по ГСЗ.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, отражающие элементы, контроль и моделирование антенных характеристик, геостационарные спутники Земли.

**Abstract.** The paper suggests ways to control the characteristics of the radio telescope RATAN-600 using the geostationary satellites. The results of the measurement of two-dimensional antenna patterns and focal spots, the reflecting elements and groups of elements of the radio telescope efficiency (contribution) are presented, as well as the comparison of the measured characteristics with the model. A method for estimating the parameters of the antenna efficiency on measured, calculated and approximated characteristics is considered, estimates of the achievable accuracy in a feasible measurement region are given. The results show highly informative and effective method for monitoring of the radio telescope performance using the geostationary satellites.

**Key words:** radio telescope, reflecting elements, monitoring and modeling of antenna characteristics, geostationary satellites.

## Введение

Измерение антенных характеристик крупного радиотелескопа в рабочем режиме, таких как диаграмма направленности (ДН), фокальное пятно (ФП), СКО отражающей поверхности, эффективная площадь и др., представляет значительную сложность из-за невозможности использовать наземные источники излучения в дальней зоне и недостаточно высокого отношения сигнал/шум (С/Ш) по космическим источникам. Такую возможность предоставляют только геостационарные спутники Земли (ГСЗ), но работа с ними имеет ряд особенностей, в т. ч. наблюдается собственное суточное движение ГСЗ, которое необходимо учитывать или отслеживать. Успешные попытки антенных измерений по ГСЗ проводились на РАТАН-600 ранее [1, 2], в работе [1] была изучена видимая траектория собственного движения ГСЗ («Горизонт», азимут  $344^{\circ}15'$ ), выполнена попытка юстировки 31 элемента Главного зеркала (ГЗ) и измерялись ДН частей ГЗ на частоте 4 ГГц, в работе [2] изучались отклики части антенной системы «Юг+Плоский» РАТАН-600 (85 м) по двум ГСЗ с азимутами  $359^{\circ}20'$  (предположительно Turksat 1B) и  $3^{\circ}5'$  на облучателе тип 3 на частотах 3.67 ГГц и 10.95 ГГц. Первые результаты и некоторые особенности антенных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 по ГСЗ Turksat 2A/3A приведены в работе [3].

Такой важный параметр антенной эффективности радиотелескопа, как эффективная площадь, традиционно измеряется по калибровочным источникам. Погрешность таких измерений обычно составляет более 10%, поскольку она включает в себя нестабильность калибровочного генератора шума (не менее 5%), погрешность знания величины калибровочной ступеньки (не менее нескольких процентов), погрешность знания потоков калибровочных источников (не менее 2-3% в коротком см диапазоне волн), погрешность наведения радиооси антенны на источник и установки облучателя в фокус

радиотелескопа. Точное знание эффективной площади наряду с возможностью оценки эффективности радиотелескопа позволяет измерять абсолютные потоки космических источников без наблюдения калибровочных источников и относительной привязки к ним. Способ оценки эффективной площади по измеренной двумерной ДН практически не применяется на радиотелескопах в см диапазоне волн из-за недостаточного отношения С/Ш по космическим источникам, особенно это относится к области далеких лепестков ДН и широкого рассеянного фона. Использование сигнала ГСЗ снимает проблему недостаточного отношения С/Ш и позволяет получить приемлемую точность измерений ДН в эффективном телесном угле, где сосредоточено не менее 95% энергии ДН. В этом случае можно достичь точности оценки параметров эффективности радиотелескопа не хуже 10%, и такой способ не требует знания абсолютных потоков калибровочных источников.

Сравнение модельных характеристик радиотелескопа РАТАН-600 с экспериментом и попытка оценки по ним параметров антенной эффективности радиотелескопа в мм диапазоне волн предпринималась в работе [4]. В работе [5] проводится сравнение измеренных по космическим источникам ДН радиотелескопа РАТАН-600 с расчетными в области главного лепестка. В работе [12] приведены результаты расчета горизонтального размера ДН антенной системы (АС) «Юг+Плоский» РАТАН-600 с учетом характеристик конкретного синусного облучателя. В настоящей работе описаны способы и результаты измерения характеристик радиотелескопа и эффективности работы элементов РАТАН-600 по ГСЗ, выполнено сравнение измеренных характеристик с расчетными. Рассматривается возможность оценки параметров антенной эффективности радиотелескопа с использованием измеренных, модельных и аппроксимированных характеристик.

## Подслеживание отклика АС на ГСЗ кареткой облучателя РАТАН-600

Для антенных измерений нами использованы ближайшие к меридиану геостационарные спутники Turksat 2A/3A с координатами: долгота спутников  $42^{\circ}\text{E}$ , высота на широте РАТАН-600 и азимут на долготе радиотелескопа в разное время года и суток равны  $H = 39^{\circ}20'—39^{\circ}40'$ ,  $\alpha = 179^{\circ}20'—179^{\circ}35'$ . Графики собственного движения ГСЗ Turksat 2A/3A по азимуту  $\alpha$  (наиболее критичная координата для РАТАН-600) в дни выполненных нами антенных измерений приведены на рис. 1.

Кривые получены при помощи программы Stellarium, выполняющей расчет положения спутников с учетом координат точки наблюдения, нутации земной оси, даты и времени наблюдения. В двух отмеченных на рисунке областях траектории спутника с наименьшим градиентом зависимости  $\alpha(t)$ , имеющей форму синусоиды с суточным периодом, азимут спутника уходит на величину не более  $1'$  за 3-4 часа вечером и утром. Этого времени вполне достаточно для измерения двумерной диаграммы направленности и других характеристик радиотелескопа.

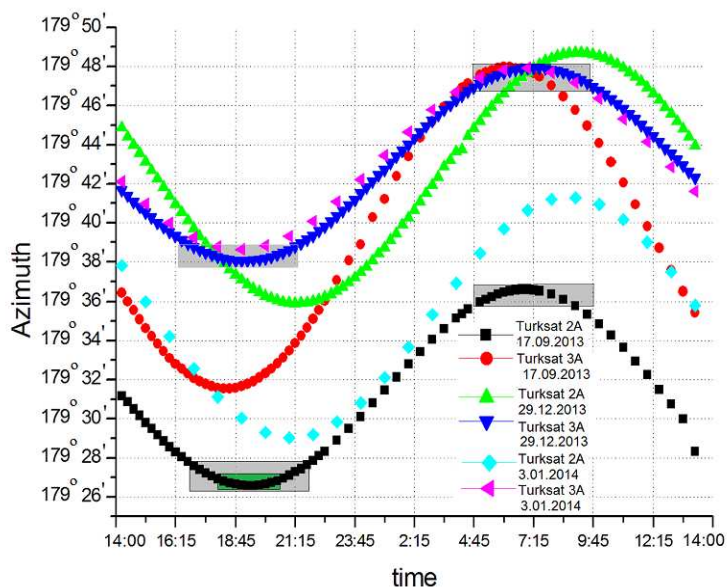
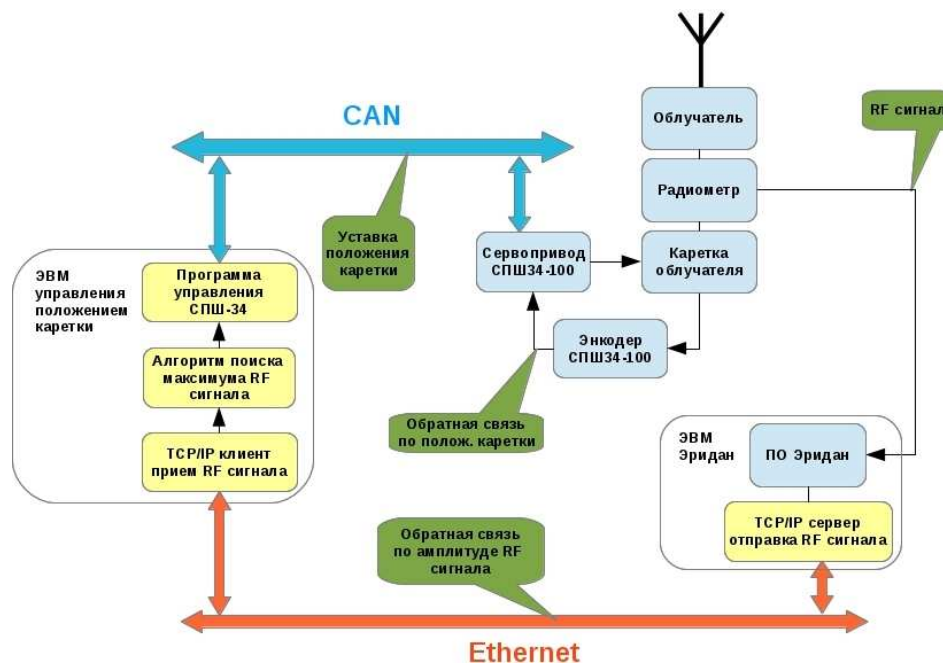


Рис. 1. Графики собственного суточного движения ГСЗ Turksat 2A/3A по азимуту

*a*



*б*

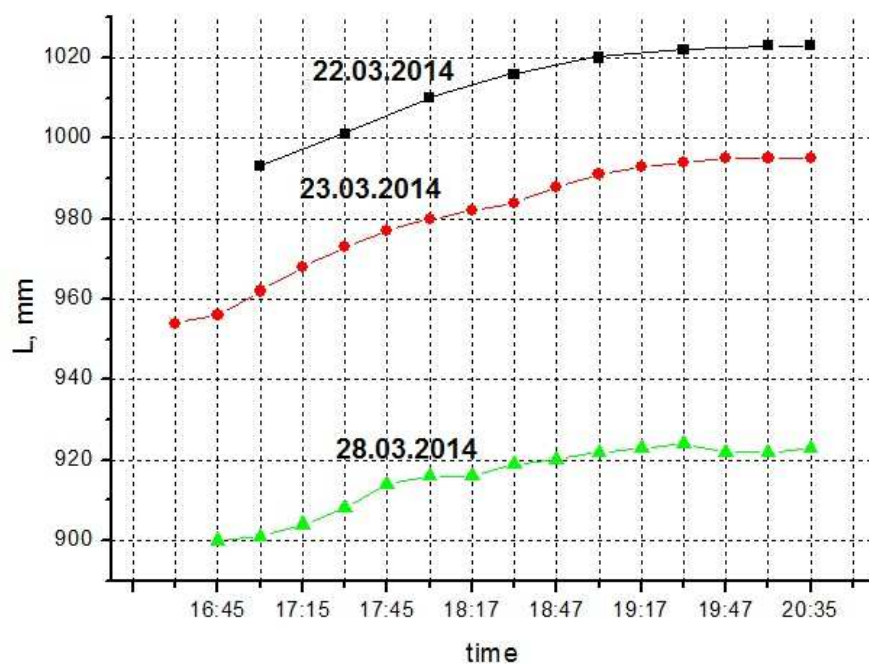


Рис. 2. *a* — схема автоматического управления и подслеживания кареткой ГСЗ по отклику радиотелескопа; *б* — изменение положения (смещение) максимума

Для снижения возможных амплитудно-фазовых ошибок, возникающих из-за собственного движения спутника в процессе длительных антенных измерений было предложено и реализовано автоматическое подслеживание кареткой облучателя радиотелескопа максимума отклика АС на сигнал ГСЗ в

пределах  $\Delta X = \pm 50$  мм, что соответствует азимутальному суточному движению спутника в пределах  $\pm 5'$ . Реализованная схема автоматического управления и подслеживания кареткой отклика радиотелескопа по ГСЗ приведена на рис. 2, а, изменение положения (смещение) максимума отклика ГСЗ Turksat 2A/3A за 3.5 часа без подслеживания кареткой — на рис. 2, б. Максимальная величина смещения в данном случае составляет  $\sim 25$  мм. Автоматическое подслеживание максимума отклика спутника кареткой осуществляется непрерывно или по команде оператора с ошибкой не более  $\pm 3$  мм.

В отличие от наблюдений космических источников в режиме прохождения, ГСЗ можно наблюдать с использованием АСУ РАТАН-600 [6] и АСУ каретки [3] в режиме наведения, сопровождения и сканирования, что позволяет избежать ошибок наведения оси антенны на источник сигнала, ошибок установки облучателя в фокус, снизить возможные фазовые ошибки и исключить человеческий фактор в процессе антенных измерений.

### **Контроль характеристик, эффективности работы щитов и групп щитов радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ**

Большой практический интерес представляет оценка эффективности работы каждого щита и групп щитов радиотелескопа. Абсолютный КПД щита включает в себя эффективность его работы как антенны, омические потери, потери на рассеяние и отражение от металла. Нас будет интересовать относительный КПД щита, т. е. эффективность его работы или вклад в сравнении с опорным или другими отражающими элементами (ОЭ). Такой вклад определяется законом облучения щитов, качеством поверхности и юстировки щита по трем координатам и другими (внешними) факторами, связанными с геометрией АС. Один сектор РАТАН-600 состоит из 225 щитов (или 167 щитов в антенной системе «Юг+Плоский»). Мощностной вклад одного ОЭ сектора крайне мал в сравнении со всей антенной ( $N$  щитов). Так, отклик одного центрального щита при спадающем облучении на краях всего сектора составит не более  $1/(N/2)^2$  отклика АС, т. е. имеет уровень около

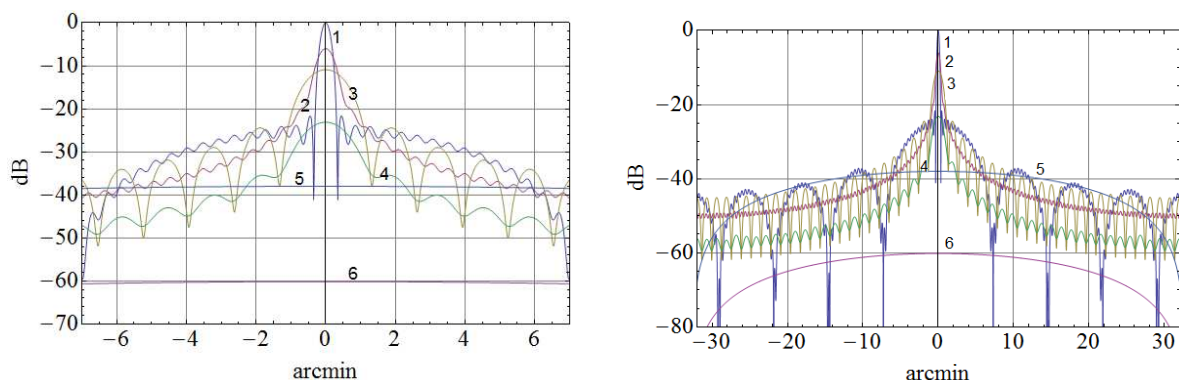


Рис. 3. Расчетные мощностные отклики на волне 2.7 см сектора (1), половины сектора (2), группы щитов в центре (3) и на краю (4) сектора, щита в центре (5) и на краю (6) сектора АС «Юг+Плоский»

–40 дБ. Мощностный отклик сигнала группы из 25 центральных щитов составляет менее –10 дБ отклика АС. Расчетные мощностные отклики разных частей АС «Юг+Плоский» приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены измеренные по ГСЗ отклики различных частей АС «Юг+Плоский». Пик 1 соответствует отклику всей антенны. Высокий уровень боковых лепестков вызван главным образом абберациями, возникающими при наведении антенны на ГСЗ, который смещен относительно геометрической оси антенны по азимуту на угол 30'-40'. Наибольший лепесток ДН вызван влиянием второго спутника-дублера (2А или 3А). Пики 2 и 3 соответствуют откликам от восточной и западной половин Южного сектора, пик 4 — отклику одной центральной группы щитов. Вклады частей антенны в целом соответствуют расчетным, но вклады восточной и западной частей сектора, как мы видим, различны, что может говорить о несимметрии облучения или погрешностях юстировки сектора и требует дальнейшего изучения.

Представленные на рис. 4 отклики АС на сигнал ГСЗ получены на облучателе тип 2, где практически невозможно получить малые внеосевые абберации при работе с источником, смещенным относительно меридиана, поскольку, строго говоря, для этого требуется развернуть сам облучатель по азимуту в горизонтальной плоскости, что не предусмотрено его конструкцией.

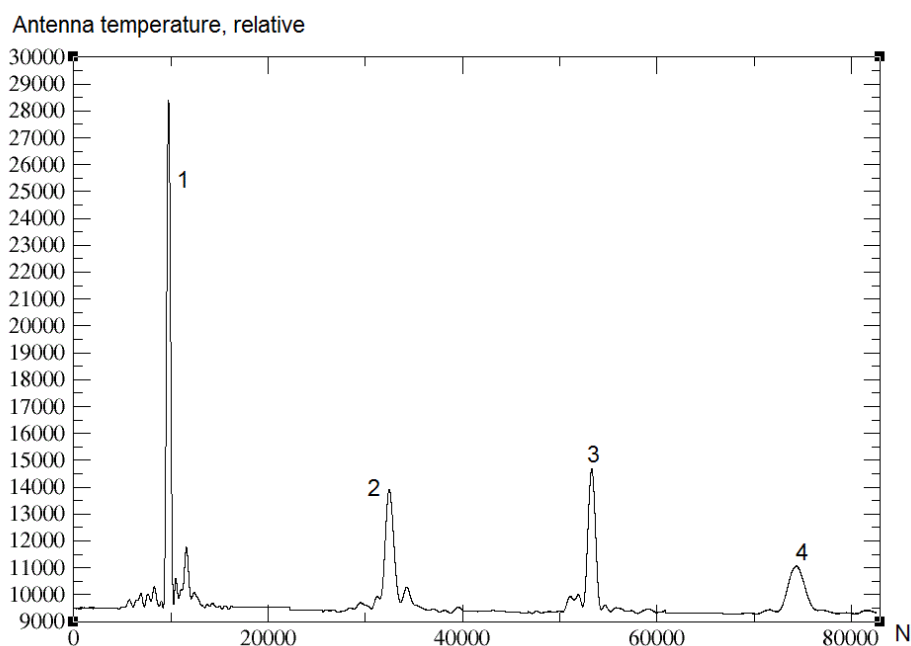


Рис. 4. Измеренные отклики на ГСЗ различных частей АС «Юг+Плоский» на облучателе тип 2, длина волны 2.7 см: вся антенна (1), восточная половина (2), западная половина (3), центральная группа щитов (4).

На облучателе тип 3 такой разворот предусмотрен на дуговых рельсах, что позволяет достичь существенно более низкого уровня внеосевых aberrаций.

На рис. 5, а приведен отклик АС на ГСЗ на частоте 11.4 ГГц, измеренный на солнечном комплексе (СК) облучателя тип 3 с синусными облучателями в режиме многоазимутальных наблюдений [11]. На рис. 5, б приведены расчетные ДН на той же частоте для спадающего на краю раскрыва до уровня  $-10$  дБ и равномерного распределения поля. Полуширина ДН (HPBW) в азимуте  $16^\circ$  в нашей модели и эксперименте по ГСЗ составляет 23.9" и 17.2" соответственно, т. е. наблюдаемое сужение ДН на СК в сравнении с расчетом весьма существенно (более 25%). Как известно, HPBW ДН линейной антенны с равномерным синфазным возбуждением может достигать  $0.88\lambda/L$  [13], что в нашем случае при горизонтальной ширине раскрыва АС «Юг+Плоский» 320 м дает  $HPBW = 16.7''$ , и потому теоретический предел в полученных результатах измерений не превышен, но он может достигаться при более высоком уровне боковых лепестков (13.2 дБ). Только при спаде амплитуды на краю линейной антенны 2.5 дБ ожидаемый уровень боковых лепестков 15 дБ, а



$HPBW = 0.92\lambda/L = 17.3''$ , в то время как в нашем случае падение амплитуды на краю апертуры существенно больше, что следует из прямых измерений вклада ОЭ на краю сектора АС.

Никаких существенных отклонений  $HPBW$  горизонтальной ДН РАТАН-600 по наблюдениям в континууме с рупорными облучателями в сравнении с расчетом на облучателе тип 1 ранее не замечено [5]. По результатам наших наблюдений опорного источника на АС «Юг+Плоский» на облучателе тип 2 и тип 3 в континууме  $HPBW$  на 11.4 ГГц составляют 23"-24", в то время как в некоторых частотных каналах СК облучателя тип 3 наблюдается видимое сужение полуширины отклика АС на ГСЗ до 17" или уширение до 26"-27". Характерно, что в тех частотных каналах, где ДН уже расчетной, наблюдается и низкий уровень боковых лепестков ДН (1-2%), в частотных каналах, где ДН шире расчетной уровень боковых лепестков существенно выше (6-8%).

Поэтому нами рассмотрен вопрос о влиянии на характеристики АС особенностей синусного облучателя СК. Некоторые аномалии в работе АС с синусным облучателем СК были замечены ранее. Так, согласно [12], сужение ДН до 10% в эксперименте относительно расчета и скачки  $HPBW$  были замечены в длинноволновом диапазоне работы приемного комплекса (на частоте менее 6 ГГц) что может говорить о переоблучении раскрыва. Расчетная  $HPBW$  ДН АС «Юг+Плоский» в меридиане согласно [12] составляет 22.97" на частоте 11.4 ГГц. В диапазоне коротких волн также может иметь место некоторое переоблучение горизонтального раскрыва но существенных скачков  $HPBW$  синусного облучателя нами не обнаружено, однако имеются быстрые вариации коэффициента усиления (КУ) в зависимости от частоты на масштабе менее 100 МГц величиной до 3 дБ. Зависимость КУ синусного облучателя по мощности в диапазоне углов облучения для одной из поляризаций приведена на рис. 6. Падение амплитуды на краю раскрыва АС «Юг+Плоский» с синусным облучателем по нашим оценкам составляет не более 8 дБ, что может дать некоторое уменьшение  $HPBW$  ДН до 22".

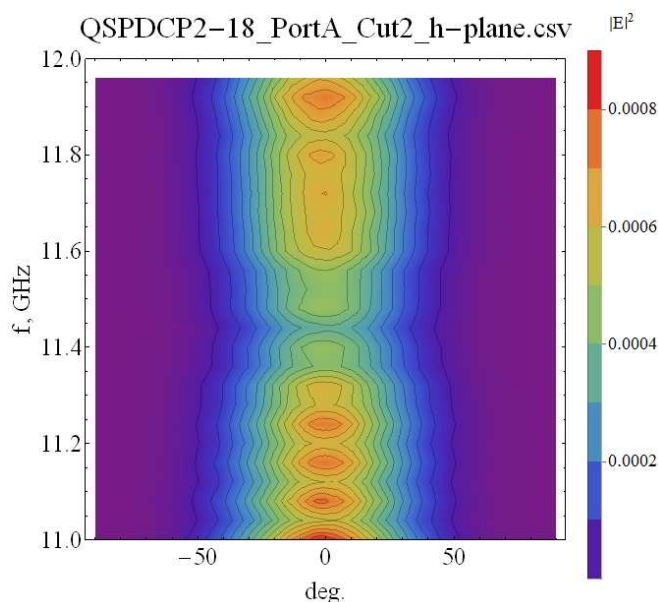


Рис. 6. Зависимость КУ синусного облучателя в диапазоне частот 11–12 ГГц и углов облучения в пределах  $\pm 90^\circ$  в одной из ортогональных поляризаций

Дальнейший анализ особенностей ДН АС «Юг+Плоский», измеренных на СК облучателя тип 3, показал, что их поведение может быть связано с недостаточно высоким динамическим диапазоном многоканального приемника СК, а именно с нелинейностью КУ некоторых каналов как при большом, так и при малом сигнале. Это приводит к компрессии вершины отклика, видимому уширению ДН и повышению видимого уровня боковых лепестков в одних каналах и к растяжению отклика, видимому сужению ДН и снижению уровня боковых лепестков в других. Этому могут способствовать и вариации КУ синусного облучателя, поскольку в результате неравномерности АЧХ уровень сигнала в соседних каналах может различаться в несколько раз. Следует отметить, что хотя антенная температура ГСЗ многократно превышает антенную температуру спокойного Солнца, близкие уровни сигнала вполне достижимы во время сильных вспышек на Солнце в см диапазоне волн.

Эффективность работы каждого щита АС может быть также детально изучена по ГСЗ. Малый мощный отклик одного щита относительно отклика всей АС (около  $-40$  дБ на рис. 3) делает невозможным измерение его относительного КПД (вклада) индивидуально без других щитов или всей антенны. На фоне всей антенны или ее части щит работает в когерентном

режиме, когда складываются не мощности, а поля, и вклад одного щита возрастает на два порядка. Этим стоит воспользоваться для измерения вклада одного щита. По результатам моделирования, вклад одного центрального щита на фоне всей антенны составляет 5% — такое падение сигнала будет в том случае, когда сигнал щита входит в противофазе с сигналом остальной части антенны. Для крайних щитов сектора аналогичный вклад щита на фоне всей антенны составит 0.4%. Вклад щита на фоне одного опорного может достигать 100% (два щита в фазе и противофазе) в центре и менее 0.01% на краю сектора. Несмотря на то, что абсолютный уровень сигнала щита на фоне одного опорного много ниже, чем на фоне всей антенны, в этом случае требуется существенно меньший динамический диапазон измерительной системы. Кроме того, практически возрастает чувствительность и стабильность измерительной системы из-за отсутствия необходимости ограничивать сигнал аттенюатором, имеющимся на входе приемной системы, который не только является источником потерь, но и вносит дополнительную нестабильность из-за температурных колебаний окружающей среды. В результате полностью используется возможности радиотехнического приемника для работы с малым сигналом, и измерение КПД щитов всего сектора по сигналу ГСЗ становятся практически выполнимыми в условиях относительно спокойной атмосферы. Расчетные уровни сигнала одного щита в различных конфигурациях, полученные в результате моделирования, сведены в табл. 1.

Несмотря на существенный вклад одного щита на фоне всей антенны и меньший, но вполне заметный вклад одного щита на фоне одного опорного щита, измерение относительного КПД (вклада) всех щитов сектора затруднено из-за собственного движения ГСЗ.

Процедура измерений вклада всех ОЭ занимает более 3 часов и фазировка антенны в целом относительно ГСЗ за это время может нарушаться, даже если подслеживать максимум отклика сигнала кареткой. Это же касается измерения

Таблица 1

Уровень сигнала щита при спаде облучения на краю раскрыва 10 дБ	Конфигурация антенны
1	Полная антенна (сфазированная)
0.95	Полная антенна, один щит в центре в противофазе
0.996	Полная антенна, один щит на краю в противофазе
0.000160	Один щит в центре
0.000639	Два щита в центре в фазе
0	Два щита в центре в противофазе
0.000187	Щит в центре и щит на краю в фазе
0.000137	Щит в центре и щит на краю в противофазе

КПД (вклада) по отношению к неподвижному опорному щиту, поскольку база между щитами может быть значительной и отклонение ГСЗ от исходного положения по азимуту может быстро (за час или менее) нарушить фазировку щитов относительно источника сигнала. Опорный и измеряемый щит образуют двухэлементный интерферометр, из-за отклонения ГСЗ от оси которого возникает дополнительная разность хода, которую нужно компенсировать, чтобы сохранить фазировку. Поэтому нами был предложен способ измерения КПД (вклада) щитов с использованием скользящей опорной группы, состоящей из четырех щитов, относительно которых измеряется КПД (вклад) последующего пятого щита. В этом случае база между опорной группой и измеряемым щитом минимальна и постоянна, что обеспечивает устойчивую фазировку интерферометра при азимутальном смещении ГСЗ. Такой способ измерений предполагает, что все щиты изначально удовлетворительно сфазированы или могут встречаться отдельные плохо сфазированные со всей антенной щиты, которые не нарушают фазировку в целом четырех щитов, взятых в качестве опорных. В случае, если указанное условие не соблюдается, необходимо провести предварительную юстировку четырех первых опорных

щитов. Измеряемый таким способом КПД можно назвать фактическим или реальным. Другой предложенный нами способ измерения КПД щитов включает измерение амплитуды (размаха) синусоиды в процессе движения измеряемого щита по радиальной координате относительно одного опорного в диапазоне нескольких длин волны, на которой ведутся измерения. В этом случае фазировка щита относительно опорного достигается в процессе движения щита, даже если она нарушается в исходном состоянии из-за ошибок юстировки или смещения ГСЗ относительно оси АС. Измеряемый таким способом КПД (вклад щита) можно назвать достижимым или потенциальным КПД по радиусу.

Выполнение юстировки щитов сектора по ГСЗ также возможно обоими способами, такие попытки выполнены в работе [3], однако в первом способе неизбежно накопление случайной ошибки в процессе выполнения измерений, а во втором — систематической ошибки по радиусу, вызванной собственным движением ГСЗ. С целью уменьшения эффекта накопления систематической ошибки кроме подслеживания кареткой максимума отклика от ГСЗ можно использовать контрольные щиты, юстируемые в начале и конце процесса юстировки на краях и в середине сектора.

Относительный КПД (вклад) всех щитов сектора, измеренный первым способом в течение трех дней (ночей) в автоматическом режиме без участия оператора, представлен на рис. 7 вверху. В процессе измерений относительного КПД (вклада) щиты последовательно наводятся по углу места на ГСЗ на фоне четырех опорных щитов, наведенных на ГСЗ. После измерений КПД данный щит становится четвертым опорным, а первый опорный отводится. Рис. 7, а демонстрирует хорошую повторяемость измерений КПД в разные дни и в различных погодных условиях. Провал в центре распределения вклада щитов связан с затенением главного зеркала вторичным зеркалом и наличием дырки в плоском отражателе — любой из этих факторов приводит к появлению дырки в раскрыве АС «Юг+Плоский». Результат измерения потенциального КПД по радиусу относительно опорного щита приведен на рис. 7, б. Как видно из рисунка, вклад крайних щитов сектора вполне различим, несколько щитов в

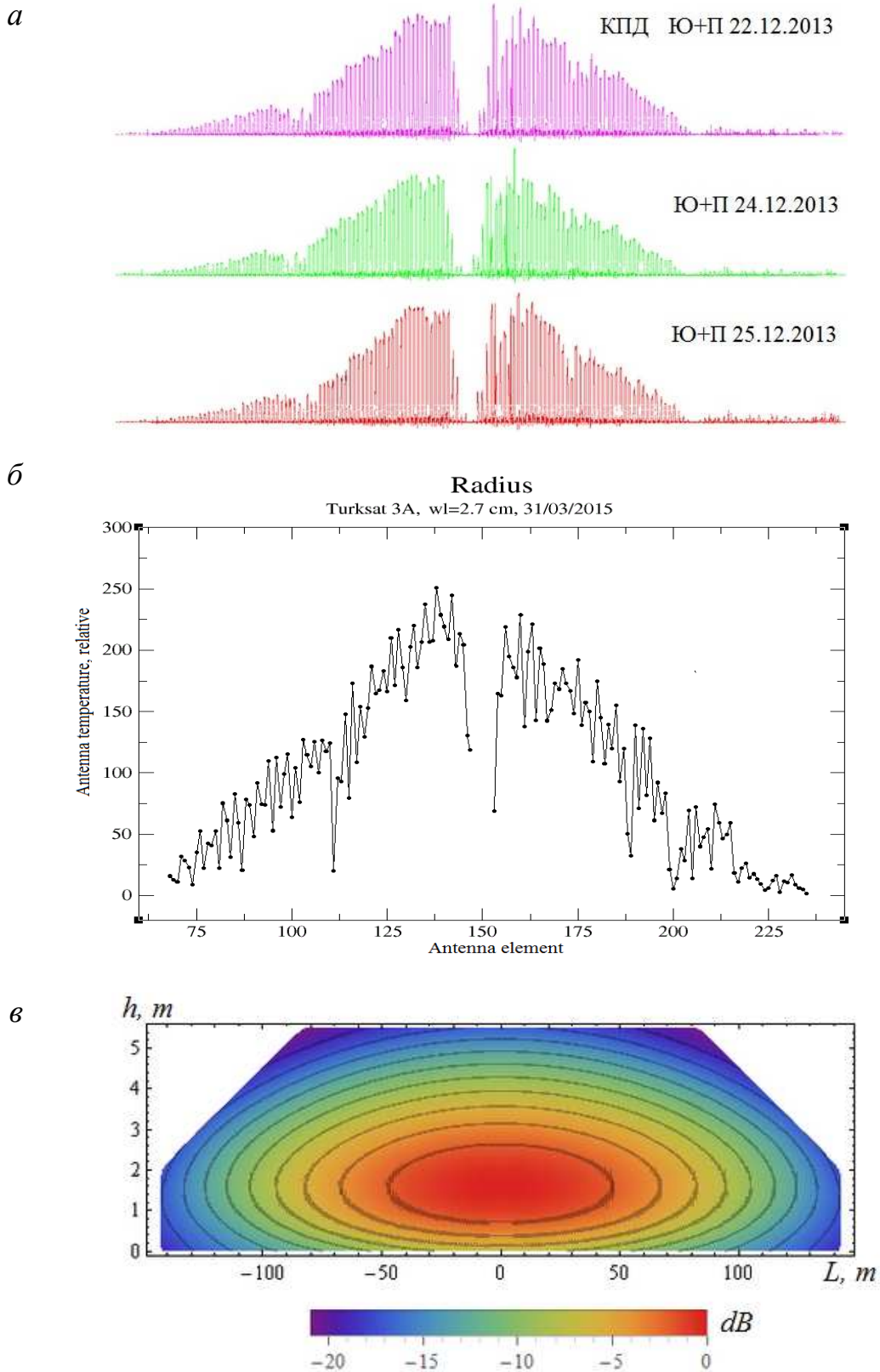


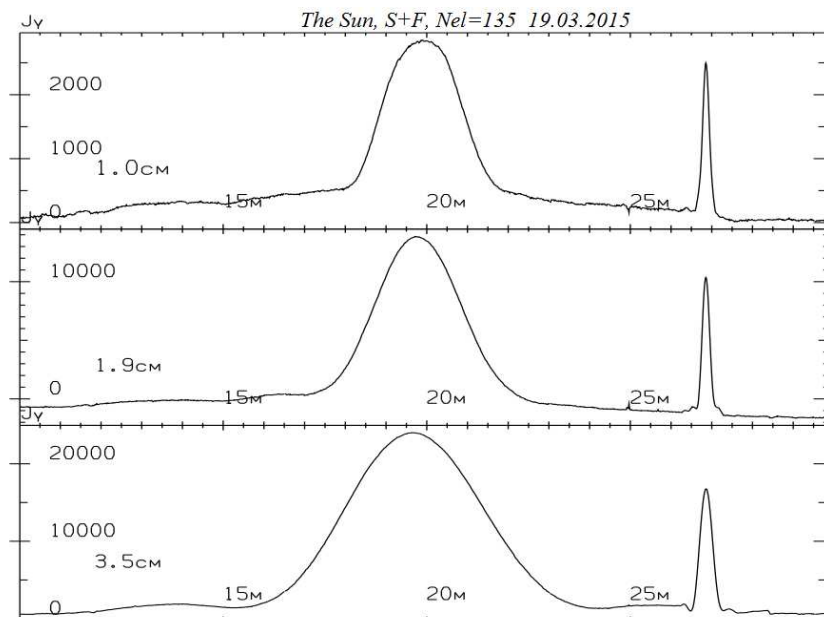
Рис. 7. *a* — реальный КПД (вклад) всех щитов сектора в течение трех ночей; *б* — потенциальный КПД щитов по радиусу, *в* — расчетное распределение мощности поля на апертуре без дырки.

западной и восточной частях сектора с малым вкладом предположительно имеют значительные ошибки по угловым координатам. Для сохранения фазировки щитов относительно опорного нами выполнялась подстройка каретки на максимум отклика АС на ГСЗ в начале процесса измерений и после измерения КПД половины щитов АС «Юг+Плоский».

Рис. 7 демонстрирует значительную неравномерность реального и потенциального вклада щитов, что требует дальнейшего исследования. Кроме того, видна некоторая асимметрия вклада щитов (крайние щиты западной части сектора дают больший вклад).

Разделение факторов, уменьшающих КПД (вклад) щита, требует индивидуальной работы с каждым щитом, его юстировки и оценки качества отражающей поверхности. Измерение качества отражающей поверхности щита по его отклику на ГСЗ на волне 2.7 см не даст высокой точности, поэтому для оценки СКО поверхности нами было предложено измерять отклик щита по протяженному источнику (Солнцу) на волне 10 мм, что позволяет легко выделить рассеянный фон щита. На рис. 8 приведен отклик щитов № 135 и № 136 по Солнцу при неподвижном и движущимся облучателе на волне 1 см, 1.9 см и 3.5 см. На рис. 9 показан результат моделирования отклика по Солнцу для аналогичной конфигурации АС. На волне 1 см и 1.9 см видна подложка (особенно у щита № 136), вызванная диффузным рассеянием, обусловленным случайными ошибками поверхности щита. Оценки интеграла по всему отклику и подложке дают СКО поверхности щита не хуже 0.45 мм, т. е. менее  $\lambda/50$  на волне 2.7 см, что не может быть причиной заметного уменьшения КПД (вклада) щитов на волне 2.7 см. Попытки юстировки щитов по трем координатам улучшают их КПД (вклад), но полностью избавиться от неравномерности вклада щитов не удается, что говорит о возможном влиянии других (внешних) причин, среди которых могут быть щели между щитами Плоского отражателя и качество юстировки его панелей, щели между панелями вторичного зеркала и качество поверхности его панелей. На рис. 10 приведен результат измерения топографии вторичного зеркала облучателя тип 2 с помощью лазерного сканера

*a*



*б*

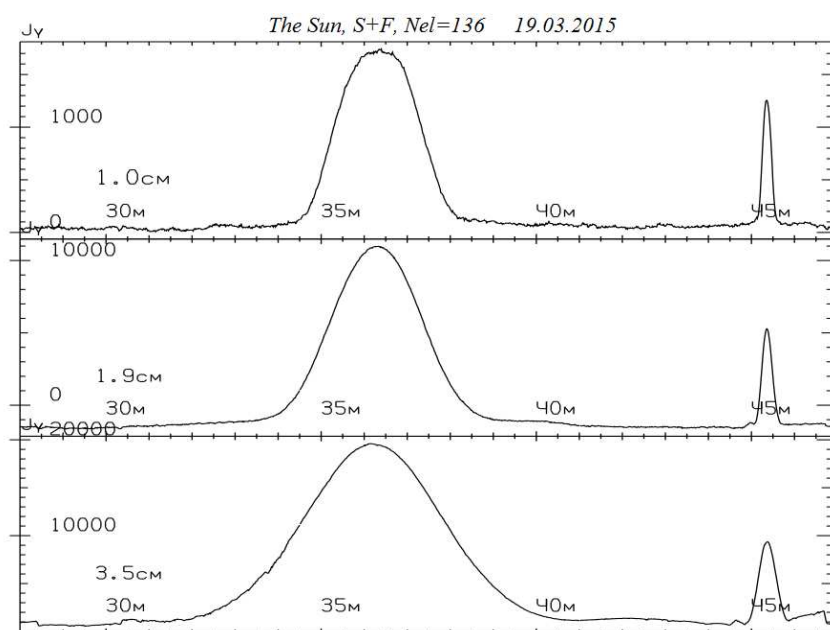


Рис. 8. Отклик по Солнцу для щита № 136 (*a*) и № 135 (*б*) на волне 1 см (вверху), 1.9 см (в середине) и 3.5 см (внизу)

Surphaser [7] и вид панелей плоского отражателя. Дальнейшее изучение и разделение всех факторов влияющих на относительный КПД (вклад) щитов позволит повысить эффективность работы отдельных щитов и АС в целом.



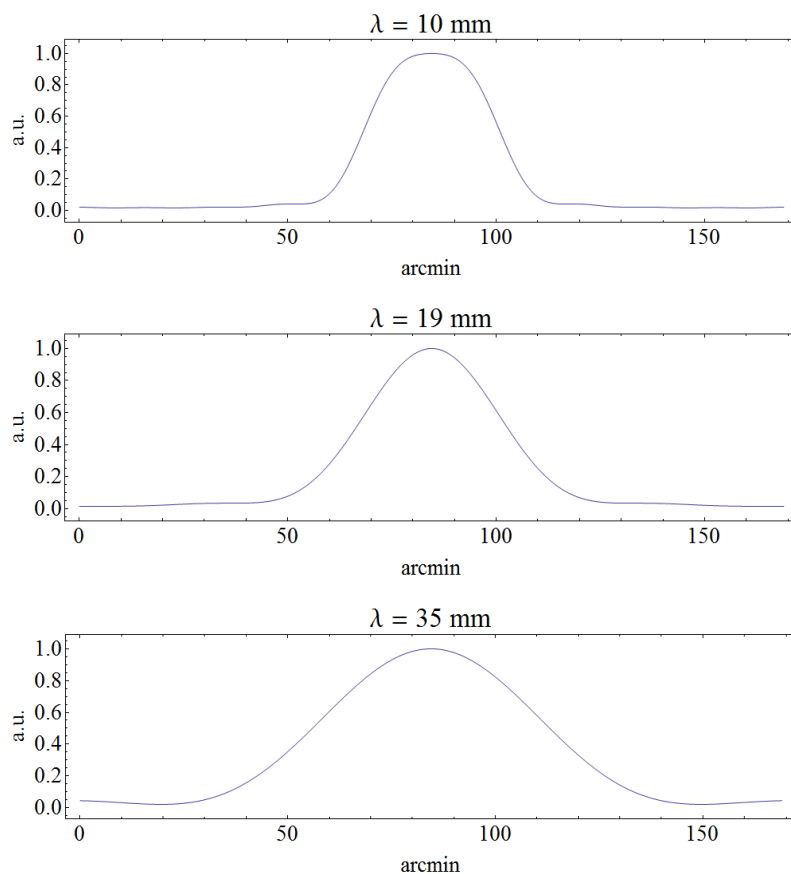


Рис. 9. Результаты моделирования отклика от одного щита по Солнцу на разных волнах

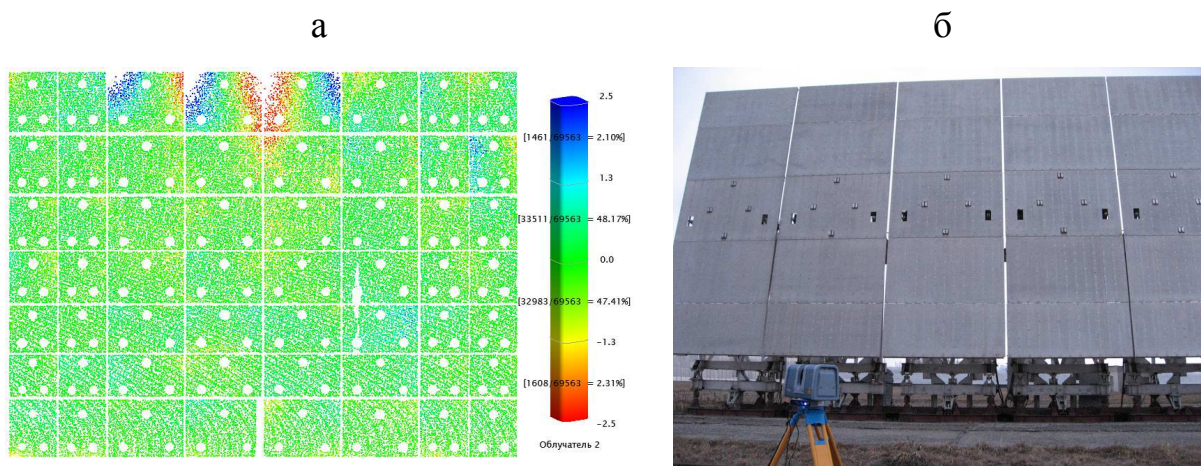


Рис. 10. Результат измерения топографии вторичного зеркала облучателя тип 2 с помощью лазерного сканера Surphaser СКО=0.45 мм (а), вид щитов плоского отражателя (б).

Измерение отклика АС «Юг+Плоский» в ее рабочем положении по ГСЗ позволяет найти оптимальный продольный и поперечный фокус АС за

несколько минут измерений смещением продольного фокуса расчетной параболы и перемещением каретки облучателя, в то время как поиск оптимального фокуса в режиме прохождения космических источников занимает несколько дней. Результаты измерения положения фокуса АС «Юг+Плоский» по ГСЗ приведены в [3,11]. Предложенный способ позволил найти оптимальное положение продольного фокуса АС «Юг+Плоский» на облучателе тип 3, которое на 5 мм - 15 мм отличается от расчетного в зависимости от азимута наблюдений [11].

### Оценка параметров антенной эффективности по измеренной двумерной диаграмме направленности РАТАН-600

По одному из определений эффективной площади антенны [8],

$$S_{\text{eff}} = \eta_r \frac{\lambda^2}{\int_{4\pi} P_n(x, y) d\Omega}, \quad (1)$$

где элемент телесного угла  $d\Omega$  в декартовых и сферических координатах равен:

$$d\Omega = \frac{dx dy}{\cos \theta} = \sin \theta d\theta d\varphi$$

( $\theta = 0 \div \pi$ ,  $\varphi = 0 \div 2\pi$ ). Тогда в сферических координатах

$$S_{\text{eff}} = \eta_r \frac{\lambda^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_n(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (2)$$

где  $P_n$  — нормированная ДН,  $\eta_r$  — излучательная эффективность или КПД антенны, которая отражает отличие реальной антенны от идеальной,  $1 - \eta_r$  — доля энергии, собираемой антенной, поглощенная самой антенной; как правило,  $\eta_r$  отражает внутренние омические потери в самой антенне: потери на отражение от металлической поверхности, потери в облучающем рупоре и антенном тракте, потери на разогрев элементов конструкции, грунта. Активная часть сопротивления антенны состоит из сопротивления излучения и сопротивления потерь. В режиме работы антенны на передачу  $\eta_r$  — отношение мощности, излучаемой антенной, к подводимой к ней мощности. В наше случае

$1 - \eta_r$  характеризует потери, которые не отражаются в нормированной ДН, имеющей как дифракционные лепестки, так и рассеянный фон. Нередко КПД антенны понимают в более широком смысле, включая в него переоблучение главного и вторичного зеркал, с которым связаны безвозвратные потери энергии [9]. Поскольку измеренная и модельная ДН отражают характер облучения и переоблучения раскрыва, в значительной степени определяющего уровень боковых лепестков и связанные с ними потери энергии, мы будем понимать КПД антенны в узком смысле омических потерь в облучателе и самой антенне.  $\eta_r$  обычно падает из-за потерь на отражение только в мм и субмм диапазонах волн, но и там потери на отражение в металле обычно составляют доли процента. Омические потери в первичном рупоре и антенном тракте радиотелескопа в см диапазоне волн обычно также незначительны. Оценить величину  $\eta_r$  радиотелескопа практически сложно, но в интересующем нас диапазоне волн (2.7 см) потери  $1 - \eta_r$  обычно не превышают нескольких процентов и мы можем ими пренебречь, поскольку точность метода оценки эффективной площади по ДН не может быть выше 10% из-за ограниченности области измерения и погрешностей счета или аппроксимации характеристик антенны.

Находя отношение измеренной  $S_{\text{eff meas}}$  к расчетной  $S_{\text{eff calc}}$ , полученной по той же формуле (1), можно найти эффективность, связанную со случайной ошибкой поверхности

$$\eta_{\text{er}} = \frac{S_{\text{eff meas}}}{S_{\text{eff calc}}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{\text{n calc}}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{\text{n meas}}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi},$$

и саму ошибку поверхности. Согласно [10],

$$\eta_{\text{er}} = e^{-\sigma^2} + \frac{1}{\eta_{\text{a0}}} \left( \frac{c}{D} \right)^2 (1 - e^{-\sigma^2}),$$

где  $\eta_{a0}$  — апертурная эффективность идеального рефлектора (без ошибок поверхности),  $c$  — радиус корреляции ошибок поверхности,  $\sigma$  — среднеквадратичная фазовая ошибка в апертуре:

$$\sigma = \frac{4\pi\varepsilon}{\lambda},$$

$\varepsilon$  — СКО отражающей поверхности.

Первый член в  $\eta_{er}$  соответствует случайной мелкомасштабной ошибке, второй член существенен при крупномасштабной фазовой ошибке в раскрыве и большом радиусе корреляции ошибок. При  $c \ll D$  вторым членом выражения можно пренебречь.

Выясним возможность достижения приемлемой точности оценки  $S_{\text{eff meas}}$  по формуле (1) при ограниченности области измерений  $\Omega_{\text{exp}} \ll 4\pi$ . По этой причине мы можем получить меньшее значение интеграла по ДН и следовательно завышенную  $S_{\text{eff meas}}$ .

$$S_{\text{eff meas}} \approx \frac{\lambda^2}{\int_{\Omega_{\text{exp}}} P_{n \text{ exp}}(x, y)d\Omega + \int_{4\pi - \Omega_{\text{exp}}} P_{n \text{ calc}}(x, y)d\Omega} = \frac{\lambda^2}{\int_{\Omega_{\text{exp}}} P_{n \text{ exp}}(x, y)d\Omega(1 + I)},$$

где

$$I = \frac{\int_{4\pi - \Omega_{\text{exp}}} P_{n \text{ calc}}(x, y)d\Omega}{\int_{\Omega_{\text{exp}}} P_{n \text{ exp}}(x, y)d\Omega}.$$

Оценим эффективный телесный угол  $\Omega_{\text{eff}}$ , где  $I < 5\%$  на волне 2.7 см с помощью расчетной ДН, задавая при расчете ДН максимально возможную случайную ошибку отражающей поверхности 1 мм (СКО) с характерным масштабом существенно меньше горизонтального размера щита. Двумерная ДН АС «Юг+Плоский» может быть измерена по ГСЗ с помощью наклона Плоского отражателя и перемещения каретки облучателя, область движения которой ограничена диапазоном  $\pm 70$  см в наилучшем случае при расположении источника сигнала на оси. Именно здесь возникают ограничение области измерения и потому задача оценки связанных с этим потерь энергии ДН сводится к одномерной. Расчет ДН выполнялся апертурным методом, причем

распределение поля на апертуре определялось методами геометрической оптики. Данный метод позволяет рассчитать ДН в ограниченном диапазоне углов вблизи главного лепестка, в то время как для оценки параметров антенной эффективности необходимо знать ДН во всем возможном диапазоне углов. Но рассчитанные нами ДН позволяют подобрать подходящую аппроксимирующую функцию ДН и далее работать с ней. Результаты расчета ДН приведены на рис. 11.

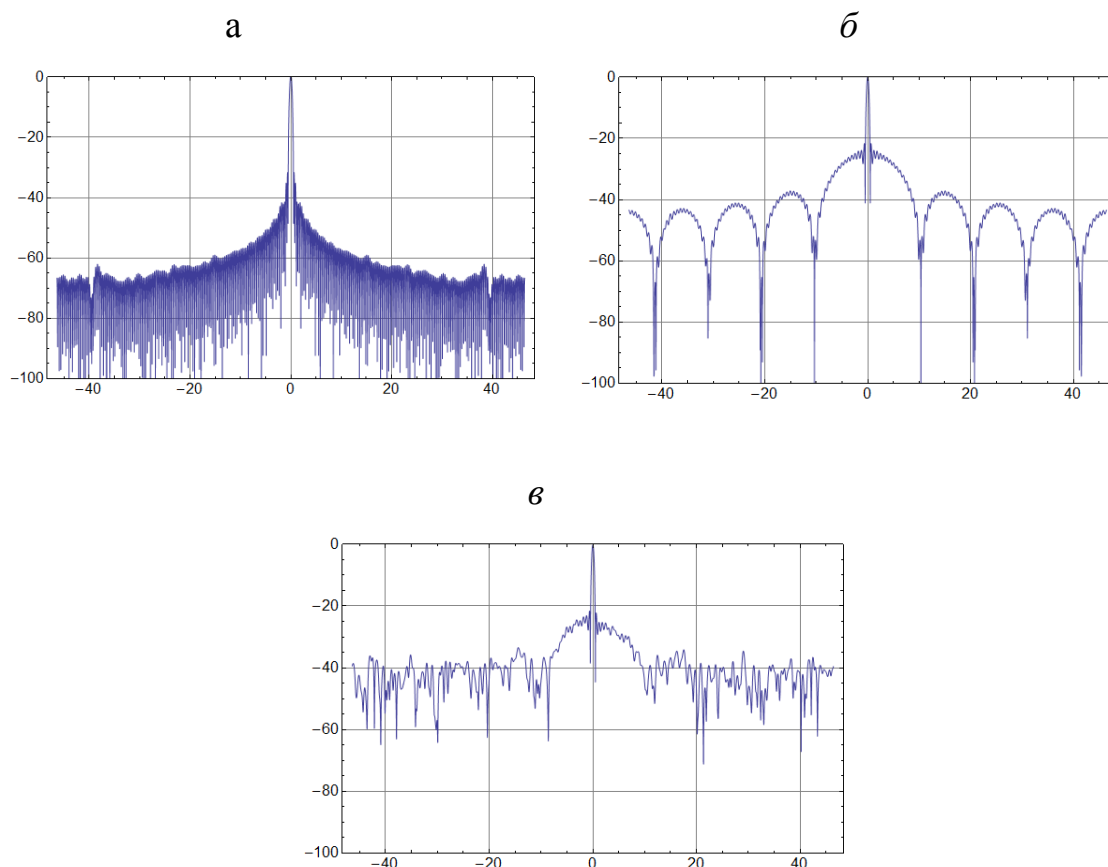


Рис. 11. Расчетные ДН АС «Юг+Плоский» без учета (а) и с учетом (б, в) наличия дырки в плоском (а); б — без ошибок поверхности, в — СКО поверхности 1 мм

Из рис. 11, б видно, что дырка в раскрыве существенно изменяет уровень боковых лепестков. Оценки показывают, что условие  $I < 5\%$  достигается в первом случае (рис. 11, а) в диапазоне  $\varphi < \pm 0.3^\circ$ , что меньше пределов перемещения каретки облучателя ( $\pm 70$  см). Время измерений одного сечения двумерной ДН составляет не более 1 минуты. При необходимом числе сечений 40-50 полное время измерений двумерной ДН не превышает 40-50 минут, что

вполне допустимо в периоды медленного смещения спутника по азимуту (см. рис. 1).

Более сложная ситуация возникает в случае, показанном на рис. 11, б, в, где уровень далеких боковых лепестков возрастает на 20 дБ. Поскольку рост уровня боковых лепестков ДН связан с наличием дырки в раскрыве, найдем ДН дырки и попробуем ее аппроксимировать какой-либо известной функцией. На рис. 12 вверху показана ДН дырки, полученная как разность ДН антенны без дырки и с дыркой. Нами были получены оценки сверху и снизу для ДН дырки по характеру спада уровня лепестков в области, в которой производится расчет (рис. 12, а). Более близкой известной аппроксимирующей функции сверху нам найти не удалось. Далее мы предположили, что справедливость найденных оценок сохраняется и за пределами области расчета. Вид и графики аппроксимирующих функций, использованных для оценки ДН дырки сверху и снизу в более широких пределах приведены на рис. 12, б.

Чтобы оценить качество предложенной аппроксимации, вычислим интегралы от функций оценок сверху и снизу по координате  $x$ , соответствующей координате  $\varphi$  на небе, вне пределов области, в которой выполняется расчет ( $0' - 30'$ ), и сравним их со значением интеграла от расчетной функции ДН внутри этой области.

$$\int_0^{30} P(x) dx + \int_{30}^{\infty} (aJ_0(x))^2 dx = 0.2398;$$

$$\int_0^{30} P(x) dx + \int_{30}^{\infty} \left( \sum_{i=1}^9 \frac{a_i \sin^i(x)}{x^i} \right)^2 dx = 0.2148.$$

Как видно из полученных оценок, основной вклад в результат интегрирования дает интеграл от расчетной функции ДН в области  $0' - 30'$ . Проведенные нами расчеты показывают, что при аппроксимации ДН дырки функцией оценки снизу необходимая область измерений ДН АС «Юг+Плоский» составляет  $< 10'$  и находится в пределах области перемещения каретки. При аппроксимации ДН дырки функцией оценки сверху требуемая

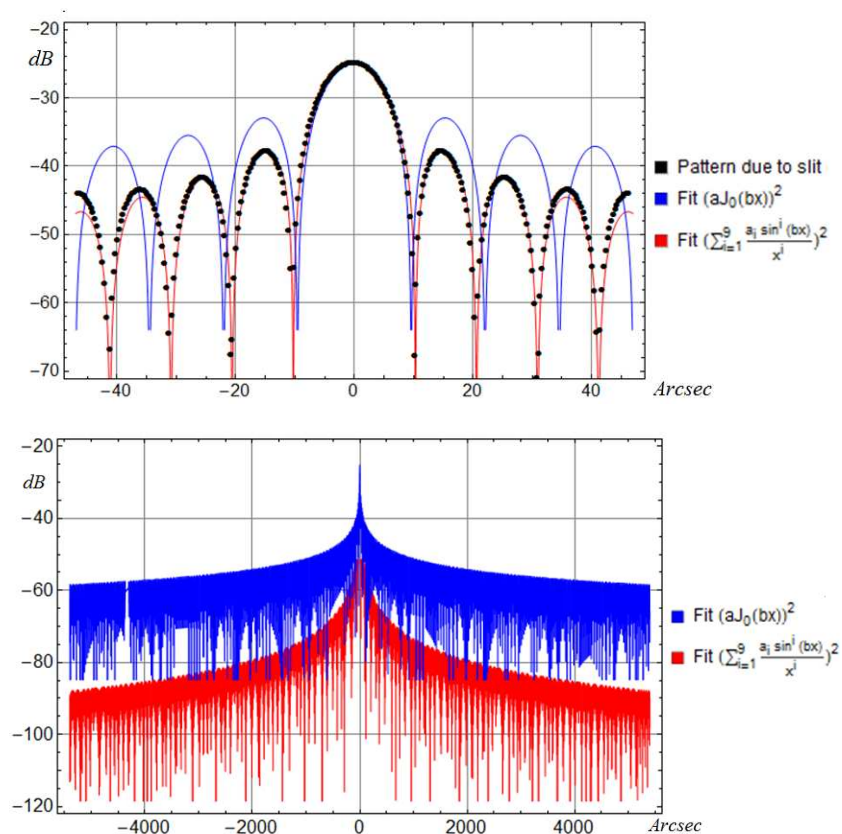


Рис. 12. ДН дырки и аппроксимирующие функции для оценок ДН  
сверху и снизу

область измерений ( $< 80'$ ) лежит за пределами области перемещения каретки. Таким образом, можно сделать вывод о том, что точность измерений параметров эффективности не хуже 10% в случае АС «Юг+Плоский» при предложенной нами аппроксимации недостижима и решение задачи требует применения более точных методов расчета ДН АС «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 [14] или нахождения более точной аппроксимации ДН сверху. Возможность выполнения оценок параметров антенной эффективности с точностью 10% по измеренной ДН Северного сектора на низких углах наблюдений, где нет дырки в раскрыве, но ДН близка к ножевой, сомнений не вызывает, случай средних и высоких углов наблюдений на Северном секторе также требует дополнительных исследований.

### Результаты измерений и моделирования двумерных характеристик радиотелескопа РАТАН-600

На рис. 13 приведено двумерное ФП АС «Юг+Плоский», полученное по

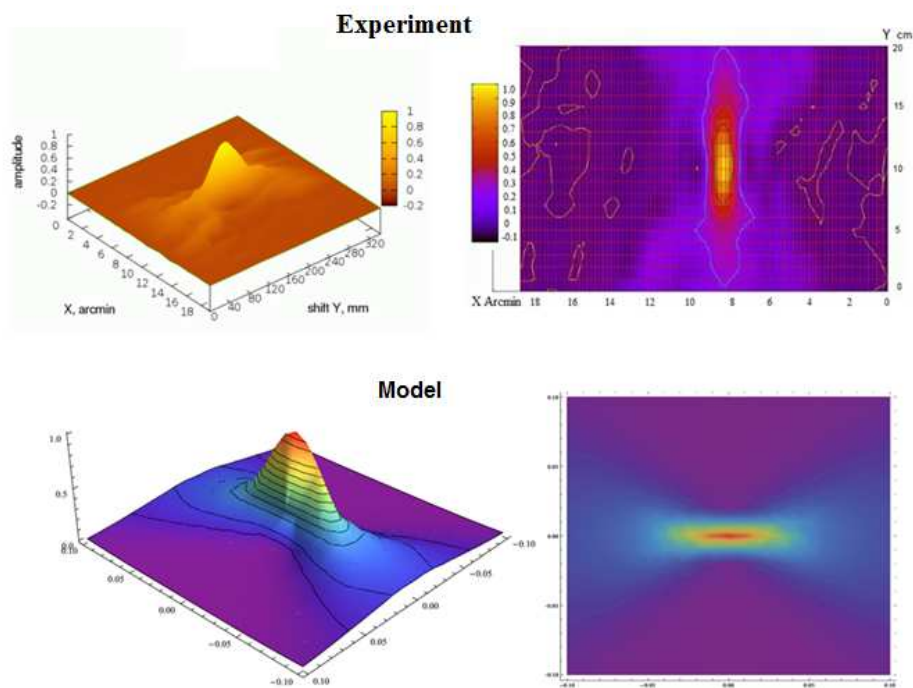


Рис. 13. Двумерное фокальное пятно на волне 2.7 см в эксперименте (вверху) и в модели (внизу)

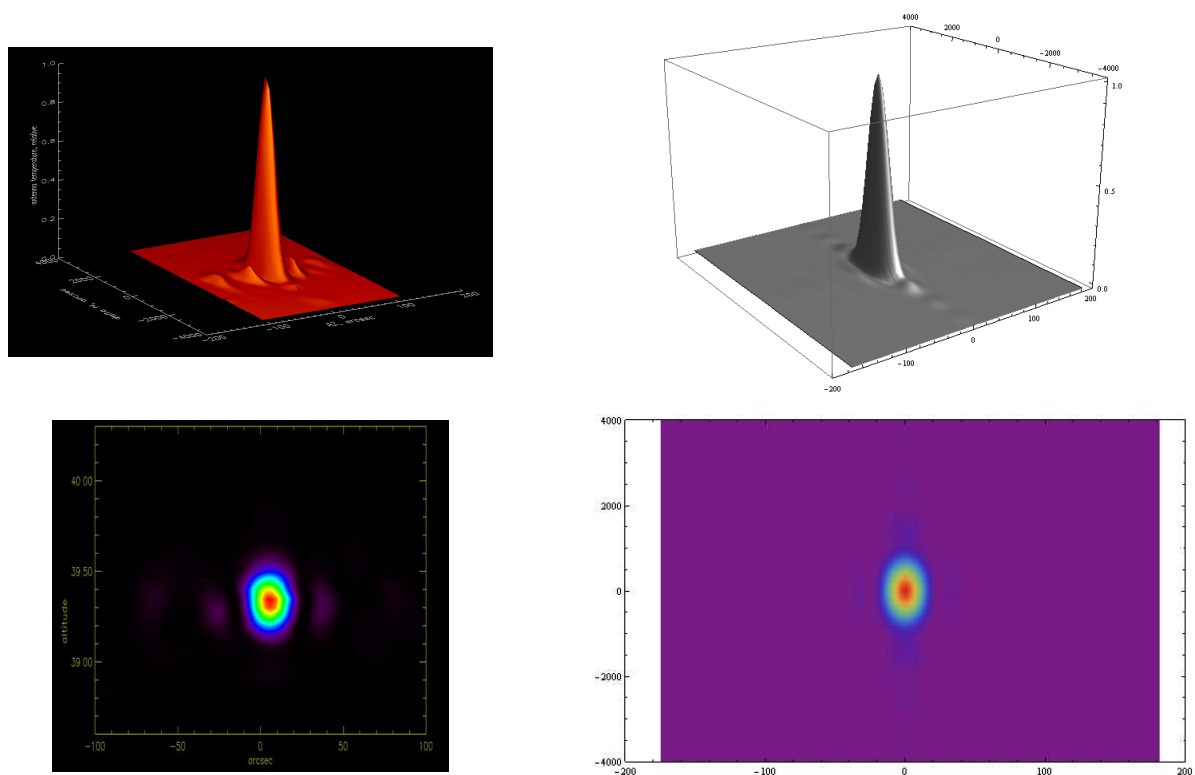


Рис. 14. Измеренная двумерная ДН и ее изофоты (слева) на волне 2.7 см, по оси ординат — высота источника в градусах и минутах, расчетная двумерная ДН на волне 2.7 см при СКО поверхности 1 мм и ее изофоты (справа), по осям угловые секунды



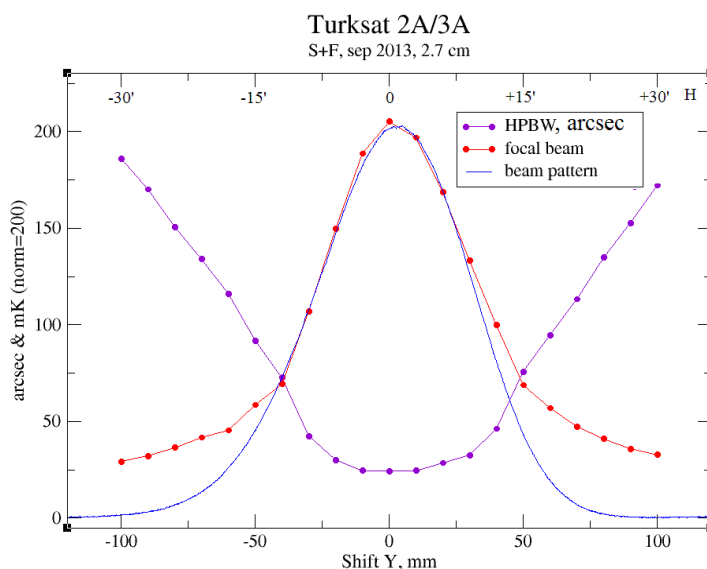


Рис. 15. Сравнение измеренных вертикальных сечений ДН и ФП, HPBW горизонтальных сечений ФП

ГСЗ Turksat 2A/3A с помощью движения облучателя тип 2 по радиальному рельсовому пути и каретки облучателя, в сравнении с моделью. Центральная часть ФП, как и ДН, имеет ножевую форму, а в целом ФП — гантелевидную из-за возникающей при смещении облучателя расфокусировки антенной системы.

На рис. 14 слева представлена ДН на волне 2.7 см, измеренная на СК с помощью наклона плоского отражателя АС «Юг+Плоский» в пределах  $\pm 0.85^\circ$  и движения каретки облучателя тип 3 в пределах 30 см при использовании многочастотного солнечного комплекса [11]. На рис. 14 справа приведена расчетная двумерная ДН АС. Различия в уровне боковых лепестков измеренной и расчетной ДН могут быть также связаны с особенностями облучения горизонтального раскрыва (переоблучение) и недостаточно высоким динамическим диапазоном СК облучателя тип 3 для приема сигнала ГСЗ.

На рис. 15 приводится сравнение измеренных вертикальных ДН и ФП. Их форма совпадает до уровня  $-3$  дБ, как и следует из теории, а далее сказывается расфокусировка антенной системы при продольном смещении облучателя из фокуса АС. Измерение двумерных ФП и их сравнение с моделью позволяет оптимизировать фокусировку АС. HPBW измеренных и модельных сечений ДН

совпали с точностью не хуже 5%.

## Заключение

В работе описаны методы и результаты контроля характеристик радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ на АС «Юг+Плоский», включая измерение диаграмм направленности, эффективности работы частей антенны и КПД (вклада) ее элементов. Полученные нами результаты показывают высокую информативность и эффективность предложенных методов контроля. В то же время следует сделать вывод, что необходимы дальнейшее совершенствование методики расчета ДН и ее аппроксимации, а также применение более точных методов расчета ДН для оценки параметров антенной эффективности радиотелескопа по измеренным характеристикам с погрешностью не хуже 10%.

## Литература

1. Стоцкий А. А., Стоцкая И. М., Пинчук Г. А. Юстировка радиотелескопа РАТАН-600 по искусственному спутнику Земли. / XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов. Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы. Ереван, 1982. С. 254–255.
2. В. Хайкин. Контроль характеристик антенной системы «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ в новом режиме наблюдений. / Радиоастрономическая конференция. Санкт-Петербург, 1997.
3. В. Б. Хайкин, Н. Н. Бурсов, А. А. Стороженко. Юстировка и контроль характеристик радиотелескопа РАТАН-600 по ГСЗ / Тр. ВРК-2014, сентябрь 2014.
4. В. Б. Хайкин, О. В. Верходанов. Результаты моделирования двумерных диаграмм направленности и параметров радиотелескопа РАТАН-600 в сравнении с экспериментом. // Известия САО, №36, 1993. С. 166–176.
5. E. K. Majorova, S. S. Trushkin. Experimental studies of the beam pattern of RATAN-600. // Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2002. No. 54. PP. 89–122.

6. Г. С. Голубчин, Г. В. Жеканис, В. И. Фурса. Система управления главным отражателем радиотелескопа РАТАН-600 третьего поколения / Тезисы докладов XXVI Радиоастрономической конференции, с. 402. СПб., 1995.

7. V. B. Khaikin, N. N. Bursov, D. G. Viktoruk, M. Y. Druzinin, S. V. Yakovlev, A. V. Kornev. New Antenna Measurement Technologies Used to RATAN-600 Radio Telescope. / Proc. of EuCAP-2013, Goteborg, Sweden. April, 2013.

8. У. Христиансен, И. Хегбом. Радиотелескопы. М.: «Мир», 1998.

9. Е. К. Майорова. Исследование поглощения атмосферы и КПД антенны на миллиметровых волнах на радиотелескопа РАТАН-600. // Сообщения САО, 1989. № 63. С. 32–37.

10. J. Baars. The measurement of large antennas with cosmic radio sources. / IEEE Trans. Antennas Propag. Vol. AP-21. PP. 461–474.

11. В. Б. Хайкин, С. Х. Тохчукова, М. К. Лебедев, Н. Н. Бурсов, А. А. Стороженко, А. В. Шендрик, В. М. Богод. Результаты моделирования и измерений характеристик антенной системы «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 в режиме многоазимутальных наблюдений. / Тр. ВРК-2014. Пущино, сентябрь 2014.

12. С. Х. Тохчукова, А. Н. Коржавин, В. М. Богод, Е. А. Курочкин, А. В. Шендрик. Расчет горизонтального размера диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600 в режиме «Южный сектор с Плоским отражателем» с учетом параметров первичных облучателей. // Астрофизический бюллетень, 2014. Т. 69. № 3. С. 377–388.

13. Microwave scanning antennas. / Ed. R. C. Hansen. New York and London: Academic Press, 1964.

14. C. Letrou, C. Parrot, V. Khaikin, M. Lebedev, A. Boag. Near and Far Field Simulation of RATAN-600 Radio Telescope Antenna Using the MLPO Algorithm. In Proceed. of COMCAS'2011, Tel-Aviv, Israel, Nov.2011.