



ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНТРОЛЬНО-КАЛИБРОВОЧНЫМ КОМПЛЕКСАМ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ CalVal PCA КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

- Л.М. Атрошенко**, кандидат физико-математических наук, директор подспутникового полигона "Скрипалі" ООО "ЛЕС-ИНФОРМ", г. Харьков
- А.Н. Горобец**, младший научный сотрудник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков
- Н.Н. Горобец**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина, г. Харьков
- А.Л. Костриков**, старший научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков
- В.С. Купко**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор научного центра ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Л.М. Атрошенко



А.Н. Горобец



Н.Н. Горобец



А.Л. Костриков



В.С. Купко

Рассматриваются метрологические аспекты разработки, создания и размещения контрольно-калибровочных комплексов для наземного обеспечения CalVal радиолокаторов синтезированной апертуры антенны космического базирования.

The metrological aspects of the design, creation and placement of control-calibration systems for ground support CalVal of the space-based SAR are described.

Введение

Контроль и внешняя калибровка (CalVal) характеристик радиолокаторов космического базирования с высокой и сверхвысокой разрешающей способностью в период их летных испытаний и эксплуатации являются важнейшим условием качества, достоверности и, как следствие, востребованности их информационного продукта. В связи с этим рассмотрение требований к контрольно-калибровочным комплексам (ККК), осуществляющим наземное обеспечение CalVal космических радиолокаторов синтезированной апертуры антенны (РСА), становится все более актуальным.

В настоящее время существует ярко выраженная тенденция использования в качестве метрологиче-

ских средств ККК пассивных радиолокационных отражателей (ПРЛО), имеющих ряд преимуществ перед другими типами метрологических средств аналогичного назначения. Так, ПРЛО могут быть изготовлены с высокой радиометрической точностью, не задерживают отраженный сигнал. При условии точного выбора типа, конструкции и материала для их изготовления пассивные отражатели имеют не зависящую от погодных условий эффективную площадь рассеяния (ЭПР), вследствие чего могут служить и быть аттестованными как эталоны ЭПР. Они достаточно удобны для работы в полевых условиях, что важно при долгосрочном многократном штатном использовании их для контроля временного дрейфа целевых характеристик радиолокатора.

Наиболее часто в этом качестве используются трехгранные уголкового отражатели с треугольными гранями (ТУО) как самофазированные источники обратного рассеяния с высокими (при прочих равных) значениями ЭПР и мало изменяющейся вблизи нормали к переизлучающему раскрытию диаграммой обратного рассеяния. Они изготавливаются из самых разнообразных широко применяющихся в хозяйственной деятельности материалов (рис. 1), в связи

с чем доступны для изготовления не в единичных экземплярах, а как составляющие специально разработанных контрольно-калибровочных мир.

По сравнению с другими типами отражателей, ТУО просты по конструкции и технологии изготовления (см., например, [3]), обеспечивают большие значения ЭПР при минимальных размерах и мало чувствительны к ошибкам из-за нелинейности расстановки, что в совокупности и является основанием для их применения в целях калибровки и валидации характеристик радиолокаторов космического базирования.

1. Требования к геометрическим характеристиками и калибровке ТУО

Как известно [4], ЭПР трехгранного уголкового отражателя с треугольными гранями пропорциональна четвертой степени длины ребра образующих ТУО граней. Это обстоятельство приводит к требованию обеспечения высокой точности их изготовления для реализации возможности использования ТУО в качестве метрологических средств. Уже приближение геометрической оптики дает приращение максимальной эффективной площади рассеяния σ_m на величины, сопоставимые с предельно допустимой ошибкой этой величины при калибровке характеристик РСА космического базирования ($\pm 0,2$ дБ), при ошибках изготовления порядка миллиметров (табл. 1).

Электродинамическое моделирование обратного рассеяния ТУО средствами программы FEKO дает еще более пессимистические, хотя и сопоставимые по величине результаты.

Расчеты проведены в диапазоне длин внутренних ребер от 0,1 до 2 м для X-, S- и L-диапазонов. Рассчитано изменение максимальной эффективной площади рассеяния ТУО при ошибке изготовления $\pm 0,5$ мм и ± 1 мм. При рабочей длине волны $\lambda = 10$ см погрешность изготовления, равная 1 мм, даст изменения σ_m , которые составят от 0,2 % от σ_m при точном изготовлении для отражателя с длиной ребра 2 м и до 2,97 % от σ_m ТУО при его точном изготовлении с длиной ребра 0,5 м. Если длина волны $\lambda = 23$ см, ошибки σ_m составляют от 0,13 до 1,91 % ЭПР, а при длине волны $\lambda = 3$ см эти ошибки находятся в пределах от 0,36 до 5,26 %. Аналогичный

Таблица 1

Изменения максимальной эффективной площади рассеяния σ_m ТУО в зависимости от их размеров и ошибки в изготовлении

a, м	σ_m , дБ	Изменение σ_m , дБ	
		0,02	0,2
		Ошибка в длине ребра, мм	
0,217	0,00	0,1	1,4
0,243	2,00	0,2	1,6
0,273	4,00	0,2	1,8
0,306	6,00	0,2	2,0
0,343	8,00	0,2	2,2
0,385	10,00	0,2	2,5
0,432	12,00	0,3	2,8
0,485	14,00	0,3	3,2
0,544	16,00	0,4	3,5
0,610	18,00	0,4	4,0
0,725	21,00	0,4	4,5
0,862	24,00	0,5	5,0
1,025	27,00	0,6	5,6
1,218	30,00	0,6	6,3

расчет был проведен для ошибки изготовления ТУО, равной 0,5 мм. При этом, в случае $\lambda = 10$ см погрешность составляет от 0,1 % от σ_m для точно изготовленного ТУО с длиной ребра 2 м до 0,95 % от σ_m для ТУО с длиной ребра 0,5 м, при $\lambda = 23$ см – от 0,06 до 0,49 % от σ_m , а при $\lambda = 3$ см – от 0,18 до 2,63 % от σ_m при условии точного изготовления ТУО.

Еще более высокие требования предъявляются к взаимной перпендикулярности граней ТУО, нарушение которой ведет к расхождению отраженных лучей, что фактически исключает как возможность оценки линейного разрешения на местности методом установления ширины отклика на точечную цель, так и возможность радиометрической калибровки (σ_m соответственно искажается). Так, уже отклонение угла от $\pi/2$ на $0,1^\circ$ искажает результаты не менее чем на 0,1 дБ.

Еще одним источником погрешностей служит неплоскостность граней. При наличии плоских граней ТУО представляет собой систему из трех зеркал. При падении на них плоской электромагнитной волны после трехкратного отражения фор-

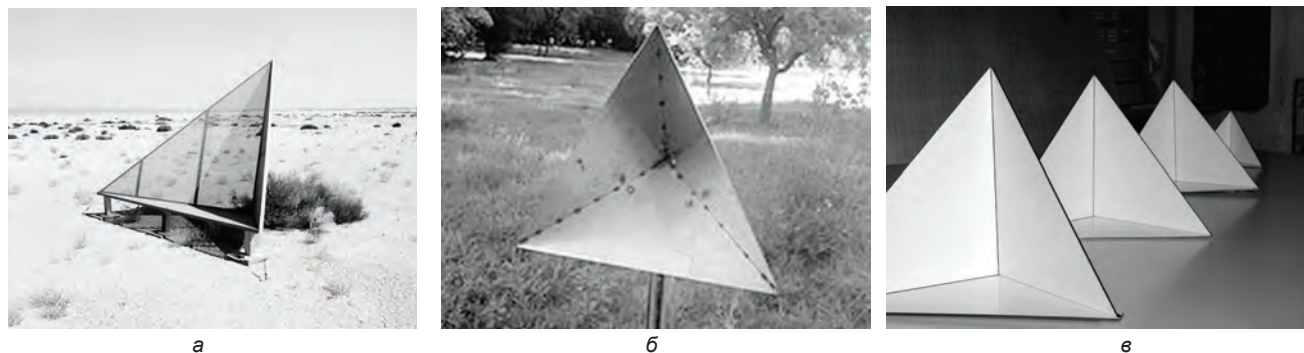


Рис. 1. Трехгранные уголкового отражатели с треугольными гранями, изготовленные из различных материалов: а – металлическая сетка [1]; б – жесть [2]; в – трехслойный композит [3]

мируется волна, распространяющаяся в направлении ее прихода. Отклонение от плоскостности уже на величину более чем $0,1\lambda$ приводит к тому, что в ТУО это свойство претерпевает значительные изменения, допустимые в таких их применениях, как постановка помех и т.п., но делающие их совершенно не пригодными для целей CalVal.

Таким образом, для разработки конструкции и изготовления ТУО для целей CalVal следует придерживаться, как минимум, следующих требований (табл. 2).

Таблица 2
Требования к точности изготовления ТУО

Характеристика	Точность не хуже
Длина внутренней стороны ребер	0,1 мм
Угол между гранями	$0,1^\circ$
Шероховатость и неплоскостность граней	$\leq 0,1\lambda$

В связи с изложенным выше, очевидно необходимым этапом разработки ККК, основанного на использовании в качестве метрологических средств ТУО, является калибровка ТУО. Первым этапом такой калибровки является измерение геометрических характеристик ТУО на координатной машине и/или на любом другом сертифицированном приборе соответствующего назначения с последующим оформлением метрологического паспорта ТУО и установкой меток-маркеров (например, тонких, легко разрываемых пленок) на внутренней стороне ребер ТУО. Затем в прямом эксперименте в безэховой камере проводится непосредственно калибровка ТУО путем сопоставления радиолокационного отклика от него с откликом от эталонной цели. В процедуре калибровки используются металлические шары для ТУО малых размеров и трехгранный уголкового отражателя с квадратными гранями – для ТУО крупных размеров (рис. 2).

Использование шаров обусловлено тем, что ТУО малых размеров, соизмеримых с длиной волны, по-

падают в резонансную область, в то время как шары с теми же значениями ЭПР еще по своим размерам существенно больше длины волны. Противоположная картина наблюдается при калибровке ТУО крупных размеров: при одинаковых значениях ЭПР линейные размеры трехгранного уголкового отражателя с квадратными гранями существенно меньше, чем размеры ТУО, что упрощает работу с ними. Кроме того, индикатриса рассеяния трехгранного уголкового отражателя с квадратными гранями имеет гораздо более острый максимум, что делает калибровку максимально точной. После окончания такой калибровки на ТУО оформляется соответствующий сертификат.

Особые требования должны быть предъявлены к опорам ТУО: они полностью должны находиться в радиолокационной тени граней отражателя. Типы опор, рекомендуемых в литературе (например, в [5]), не могут быть использованы при наземном обеспечении CalVal без ущерба для достоверности результатов. Рассмотрим простую геометрическую задачу.

На рис. 3 представлен трехгранный уголкового отражатель с длиной внутренней стороны ребра a на опоре высотой h . При максимальном угле обзора (70° от надира, см. табл. 3) опора полностью окажется в радиолокационной тени ТУО (центральная ось ТУО поднята над горизонтом на угол, равный 20°), если выполнено условие $h \leq 0,43 a$. Соответственно, при всех других углах обзора такая опора находится в радиолокационной тени ТУО и не может исказить результатов CalVal. Таким образом, высота опоры должна удовлетворять приведенному условию. Другие возможные варианты приводят к усложнению конструкции ТУО: опора должна быть либо радиопрозрачной, либо закрытой со стороны приходящего сигнала радиопоглощающим укрытием.

С другой стороны, попадание на площадь эквивалентной апертуры ТУО зеркально отраженного от поверхности ККК радиолокационного сигнала возможно лишь при углах зондирования меньше 20° от горизонтали, то есть за пределами приведенных в табл. 3 рабочих углов PCA.

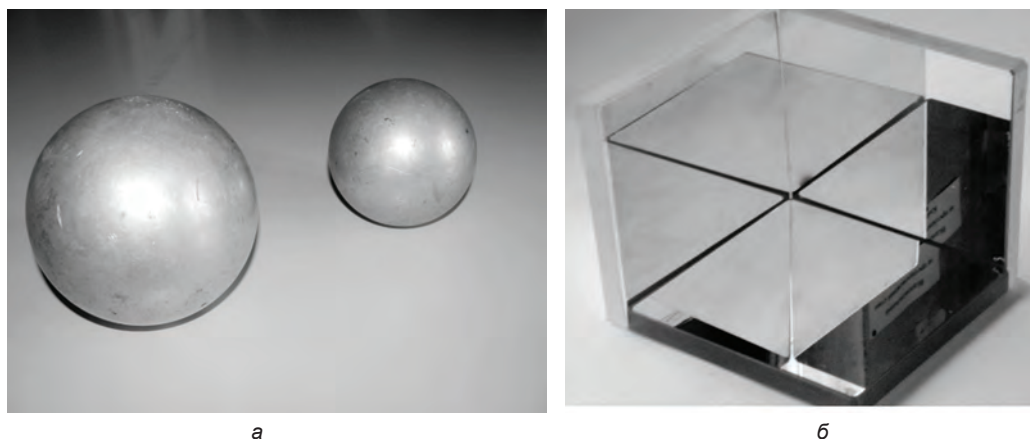


Рис. 2. Эталонные радиолокационные отражатели: а – металлические шары; б – уголкового отражатель из металлизированных зеркал

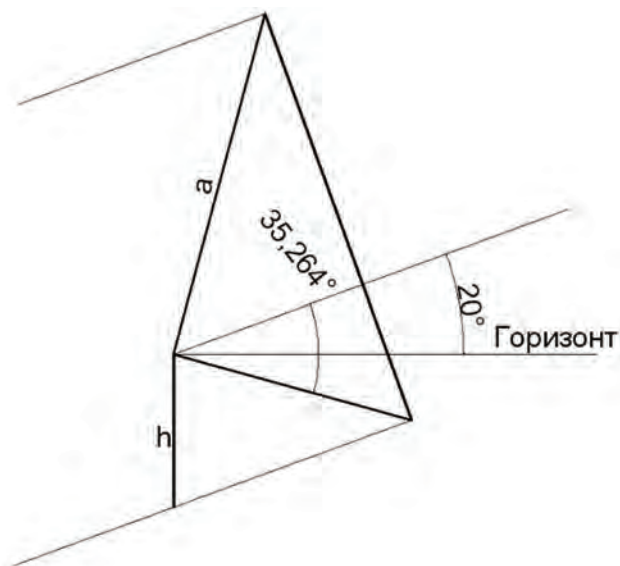


Рис. 3. Геометрия решения задачи о высоте опоры

2. Требования к комплектации контрольно-калибровочных комплексов для наземного обеспечения CalVal РСА космического базирования

Требования к составу метрологических средств и образуемых ими мир ККК в общем случае определяются программой CalVal.

Минимальными, на наш взгляд, требованиями должны быть наличие в составе ККК мира для оценки линейного разрешения на местности, мир для контроля радиометрических и поляризационных характеристик, а также наличие существенно (несколько километров или даже десятков километров) разнесенных в пространстве реперов для контроля точности географической привязки радиолокационного изображения (РЛИ), а также геометрического и радиометрического выравнивания РЛИ по кадру. Расстояние между такими реперами определяется шириной полосы захвата РСА, количество и взаимное расположение – методами математического планирования эксперимента.

Необходимым является также наличие в составе ККК набора подвижных метрологических средств для обеспечения возможности их расстановок для проведения экспериментальных исследований (например, эффекта Доплера и т.п.).

Пространственная мира оценки линейного разрешения на местности должна иметь в своем составе не менее семи (малая выборка) ТУО с одинаковой ЭПР, значение которой достаточно далеко как от резонансной области, так и от области насыщения.

Потенциальная (радиометрическая) мира должна содержать на прямолинейном участке зависимости радиолокационного отклика от ЭПР ТУО с ЭПР с шагом порядка 5...10 дБ и на краевых участках зависимости – в области насыщения и в резонансной области – ТУО с ЭПР с шагом не более 2...3 дБ, перекрывая при этом диапазон от -20 дБ до +40...45 дБ.

Поляризационная мира, в свою очередь, должна содержать, как минимум, два ТУО с одинаковой ЭПР, находящейся на прямолинейном участке зависимости “радиолокационный отклик – ЭПР”, с поляризационными решетками для определения характеристик горизонтальной и вертикальной поляризаций.

Дополнительным оснащением ККК, позволяющим расширить программу летных испытаний РСА и обеспечить возможность решения важнейших тематических задач космического землеобзора, могут быть калиброванные подповерхностные объекты, двухгранные уголкового отражатели и т.п. В таком же качестве могут использоваться наземные объекты антропогенного происхождения, например, цилиндрические опоры линий электропередач (для использования в обзорном и широкозахватном режимах), шиферные крыши (как рассредоточенные объекты с постоянной удельной ЭПР) и т.д., а также объекты антропогенно-естественного происхождения, например, незамерзающие участки русла рек (для измерения в юстировочном режиме уровня принятых сигналов от одного и того же объекта при разных температурах) и т.п.

Кроме упомянутых реперов (в том числе граничных маркеров полигона), для наземного контроля таких характеристик, как, например, параметры диаграммы направленности антенны РСА космического базирования и др., должны использоваться перемещаемые ТУО с длиной внутренней стороны ребра 2 м (в S-диапазоне их ЭПР – порядка 2120 м², σ – более 33 дБ, в X-диапазоне – 23 500 м² и 44 дБ соответственно). Для их установки на полигоне должны быть организованы опорные точки в количестве, определяемом методами математического планирования эксперимента (как правило, 100...200), географические координаты которых должны быть также определены с точностью не хуже 0,1 м. В зависимости от непосредственной задачи и методов последующей обработки результатов наблюдений, ТУО должны выставляться на территории в случайном порядке (с помощью генератора случайных чисел) или по определенной системе (в зависимости от задачи – случайная или регулярная выборка).

Необходимым в составе ККК является наличие оборудования для контроля состояния атмосферы и ионосферы в период проведения сеансов радиолокационной съемки: метеорологического оборудования (на уровне не ниже метеопоста II разряда), двухчастотного приемника ГНС. Для оперативного контроля точности расстановки метрологических средств необходимо наличие приборов ориентирования (буссолей, высокоточных компасов), высокоточных (лазерных) рулеток, угломеров и т.п.

Все используемые приборы должны быть занесены в Государственный реестр средств измерительной техники и иметь действующие свидетельства о поверке.

3. Требования к расстановке метрологических средств

Требования к взаимному расположению метрологических средств на ККК определяются многими параметрами. В первую очередь, это характеристики орбиты космического аппарата (КА): высота, тип и наклонение орбиты КА, его скорость, широта ККК. Эти данные являются исходными (ИД) для расчета азимута следа трассы КА на ККК и, как следствие, направления каналов синтезирования апертуры PCA.

Для расчета азимута следа трассы КА на поверхности ККК достаточно авиационного приближения [6], поскольку поправка, вносимая разницей между истинной и местной вертикалью, как правило, на два порядка меньше чувствительности приборов ориентирования, используемых при расстановке ТУО. Следующим определяющим требованием к расстановке метрологических средств параметром является режим радиолокационной съемки (конкретно заявленная пространственная разрешающая способность PCA в используемом режиме съемки).

На базе всех перечисленных ИД местоположение метрологических средств рассчитывается таким образом, чтобы ни одна пара из них не попала в один и тот же канал синтезирования и в один канал линейно-частотной модуляции. В табл. 3 приведены характеристики некоторых PCA, используемых в настоящее время. Как видно, в детальных режимах их работы схемы размещения должны рассчитываться, исходя из требований ширины канала синтезирования от 3 м, в обзорных режимах – от 40...60 м.

Схема размещения пассивных метрологических средств на ККК должна быть точным графическим решением, разработанным в среде Autodesk AutoCad или других аналогичных компьютерных программ.

Таблица 3
Характеристики современных PCA
космического базирования

Название	λ , см	Элемент разрешения, м	Угол съемки от надира, град
SkyMed 1-4	3,1	$\leq 1...100$	20...50
TerraSAR	3,1	1...16	20...55
TanDem	3,1	1...16	20...55
RadarSat – 2	5,6	1,5...100	10...60
Кондор	9,6	1...20	30...70
PalSAR	23,5	7...100	10...50

На рис. 4а представлена схема расстановки метрологических средств при следующих ИД:

- номинальное пространственное разрешение – 1,6 м × 2,8 м;
- высота КА – 798 км;
- наклонение орбиты – 98,6°;
- виток – восходящий;
- обзор – правый;
- угол обзора – 35,76°.

Видно, что в этом конкретном случае для размещения метрологических средств, удовлетворяющего всем перечисленным выше условиям, было необходимо расставить ТУО на расстоянии не менее трех линейных размеров ширины канала синтезирования.

На рис. 4б показано, что изменение азимута следа трассы всего на 2° при той же расстановке приводит к нарушению выполнения необходимых условий.

В соответствии с рассчитанной схемой расстановки, опоры ТУО размещаются на ККК с помощью приемников ГНСС или высокоточных приборов ориентирования и дальномеров. При этом, в случае использования магнитных приборов ориентирования следует принимать в расчет магнитное склонение, характерное для данной местности в период наблюдения.

Азимут ориентации осей ТУО рассчитывается в зависимости от типа витка (восходящий/нисходящий) и направления обзора (левым или правым бортом) как азимут следа трассы $\pm 90^\circ$.

Угол наклона осей ТУО определяется углом съемки.

Для исследования влияния неточности ориентации пассивных уголкового отражателя, то есть влияния отклонения оси отражателя от направления зондирующего сигнала, было рассчитано значение ЭПР в направлениях 1...5° от направления ЭПР_{max}. Этот расчет показал, что при отклонении на 1° изменение ЭПР составляет 0,12 % от ЭПР этих же уголкового отражателя при условии зондирования точно по оси отражателя. При отклонении на 5° ЭПР уголкового отражателя будет отличаться от расчетной на 3,04 %. Такой результат обеспечивается выбором типа радиолокационного отражателя. На рис. 5 видно, что для ТУО в диапазоне $\pm 5^\circ$ от направления максимума основного лепестка его индикатрисы рассеяния уровень сигнала обратного рассеяния изменяется в пределах 0,01 дБ.

Использование точных (лазерных цифровых) уровней и компасов (принимая во внимание местный наклон земной поверхности) позволяет добиться точности 0,5° и по азимуту, и по углу места. Это ведет к уменьшению ошибок из-за нелинейности оси ТУО и приходящего сигнала до уровня 0,1 дБ.

Контроль точности ориентирования ТУО проводится по результатам съемки. В случае точного ориентирования осей ТУО боковые лепестки диаграммы направленности радиолокационного отклика от него симметричны, в случае же ошибок в ориентировании вследствие искажения формы эквивалентной апертуры ТУО боковые лепестки становятся несимметричными. Специально разработанная компьютерная программа оценки степени симметричности боковых лепестков радиолокационных откликов ТУО позволяет отбраковывать ошибочные данные и не принимать их в расчет при статистической обработке результатов оценки характеристик PCA.

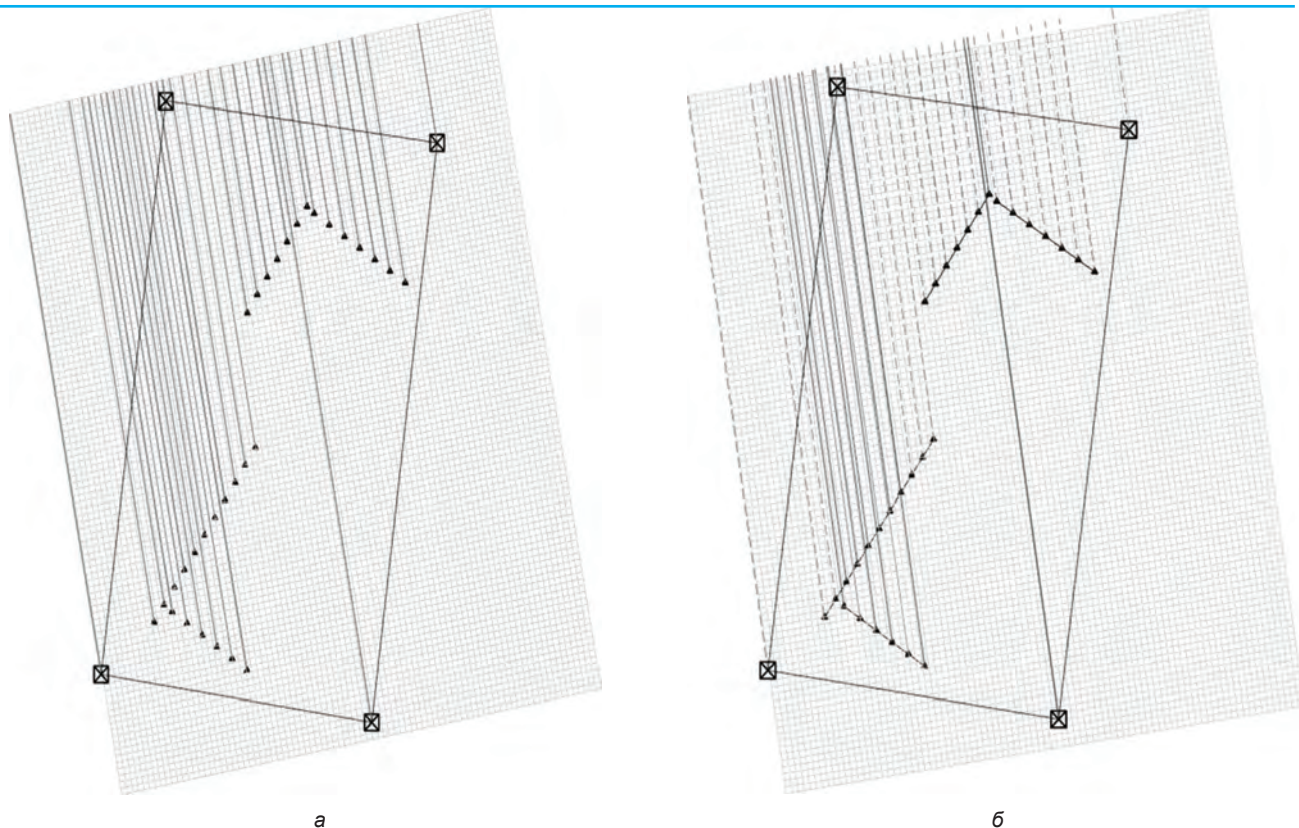


Рис. 4. Схема расстановки ТУО с точным и искаженным азимутом следа трассы КА: а – схема расстановки метрологических средств в ходе ЛЭИ ПП “Скрипалі” 14.02.2012 г.; б – та же расстановка ТУО при другом азимуте следа трассы КА

Выводы

Таким образом, при соблюдении всех перечисленных выше требований максимальные изменения ЭПР за счет ошибки в изготовлении и расстановке метрологических средств в рассматриваемых пределах составляет не более 0,2 дБ, то есть не выходит за пределы разрешающей способности по амплитуде принимаемого сигнала большинства современных РСА космического базирования. Следовательно, при изготовлении, расстановке и ориентировании ТУО-3 в составе мир калибровочных комплексов заданные параметры: допуски ± 1 мм, нарушение плоскостности и шероховатость не более $0,1\lambda$, нарушение взаимной перпендикулярности

граней не более чем на $0,1^\circ$ и точность установки по азимуту и углу места не хуже $0,5^\circ$ с соблюдением требований, накладываемых шириной канала синтезирования, – могут считаться вполне удовлетворительными.

В совокупности изложенные требования определяют необходимость применения на ККК мобильных вариантов конструкций ТУО.

Указанные требования были выполнены в полном объеме в ходе летно-экспериментальных испытаний (ЛЭИ) ККК подспутникового полигона (ПП) “Скрипалі” (Украина, Харьковская область), что и определило надежность наземного обеспечения CalVal PCA “RadarSat-2” [8].

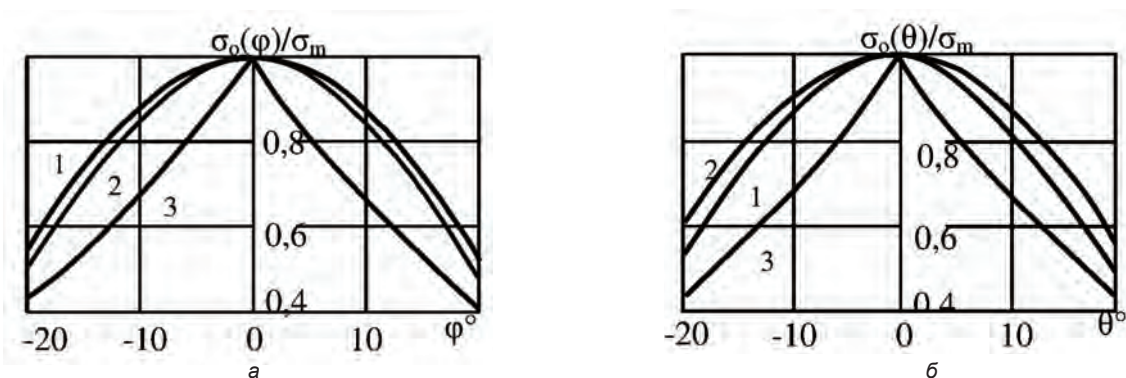


Рис. 5. Индикатрисы рассеяния угловых отражателей вблизи максимума основного лепестка [7]: а – в горизонтальной плоскости; б – в вертикальной плоскости; 1 – треугольные грани; 2 – секторные грани; 3 – квадратные грани

Сформулированные требования применимы также для контроля и измерения характеристик радиолокаторов различного функционального назначения авиационного базирования в процессе их эксплуатации.

Список литературы

1. http://novosti-kosmonavtiki.ru/forum/forum12/topic6977/?PAGEN_1=29
2. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corner_reflector.JPG?uselang=ru
3. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для PCA космического базирования / Л.М. Атрошенко, Н.Н. Горобец, А.Н. Горобец [и др.] // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина, № 1010. – Серия “Радиофизика и электроника”. – 2012. – Вып. 20. – С. 3–9.
4. Щукин А.Н. Угловые отражатели / А.Н. Щукин. – М.: Бюро новой техники, 1949. – 56 с.
5. Радиолокационные методы исследования Земли / под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 262 с.
6. Гонин Б.Г. Космические съемки Земли / Б.Г. Гонин. – Л.: Недра, 1989. – 252 с.
7. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели / В.О. Кобак. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
8. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона “Скрипалі” (“Скрипачи”, “Violinists”) / Л.М. Атрошенко, Н.Н. Горобец, А.Н. Горобец [и др.] [Электронный ресурс] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Десятая Всерос. открытая конф., 12–16 ноября 2012 г., Москва: тезисы докл. – М.: ИКИ РАН, 2012. – Режим доступа: http://smiswww.wiki.rssi.ru/d33_conf/.