

СОГЛАСОВАНО

Директор АКЦ ФИАН

Н.С. Кардашев

УТВЕРЖДАЮ

Первый зам. Генерального конструктора
и Генерального директора НПО-Л –
руководитель ОКБ

К.М. Пичхадзе

«___» _____ 2011 г.

«___» _____ 2011 г.

Изделие Спектр-Р

ПРОТОКОЛ

функциональных ограничений на ориентацию
бортовых и наземных средств проекта РадиоАстрон

118-5-СР-03-11

От Астрокосмического центра ФИАН

Н. Г. Бабакин

Б. С. Новиков

Ю. Н. Пономарев

М. В. Попов

От НПО им. С.А. Лавочкина

М. Б. Мартынов

В.Е. Бабышкин

А.Е. Евграфов

А.И. Шейхет

Настоящим протоколом определяются функциональные ограничения на ориентацию космического аппарата (КА) "Спектр-Р" (проект «РадиоАстрон»), учитываемые при формировании программы научных исследований, углы видимости КА наземными средствами управления и требования на видимость исследуемых источников наземными радиотелескопами, участвующими в проекте «РадиоАстрон». Кроме того, в протоколе определены условия проведения сеансов научных наблюдений, юстировки и лазерной дальнометрии. Приведенные ограничения не влияют на точность наведения КА, указанную в Техническом задании.

Ориентация связанных осей КА и основных элементов конструкции показана на рис.1. Связанные оси КРТ развернуты относительно осей модуля «Навигатор» вокруг оси «Х» на 180° . При проведении научных сеансов электрическая ось космического радиотелескопа (КРТ), которая для задач формирования программы научных исследований принимается совпадающей с геометрической осью, должна быть ориентирована на исследуемый источник.

Выпуск настоящей версии Протокола вызван изменениями в компоновке КА и в ряде бортовых систем, включая бортовой комплекс управления (БКУ).

1. ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕЙ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

КА «Спектр-Р» выводится на рабочую орбиту со следующими начальными параметрами (оскуляция в перигеуме):

- Наклонение $51,4^\circ$;
- Высота перигея 576 км;
- Высота апогея 330000 км;
- Период обращения $8,2$ суток.

Начальные значения аргумента перигея и долготы восходящего узла выбираются для конкретной даты старта из условий обеспечения времени баллистического существования КА не менее 9 лет, максимальной длительности нахождения КА в тени Земли не более 2 часов (с учетом возможности проведения коррекции параметров орбиты), выполнения ограничений, связанных с работой РБ «Фрегат-СБ» и оптимизации критерия качества орбит для проекта «РадиоАстрон».

2. ОГРАНИЧЕНИЯ НА ОРИЕНТАЦИЮ СВЯЗАННЫХ ОСЕЙ КА

2.1 Системы координат

Системы координат, определения которых приведены ниже, являются правыми ортогональными.

2.1.1 Базовая строительная система координат (БССК) – OXYZ.

Базовая строительная ось X направлена перпендикулярно плоскости стыка КА с переходной фермой. Положительное направление оси «X» в сторону электрической оси антенны КРТ. Базовые строительные оси «Y» и «Z» лежат в базовой поперечной плоскости. Ось «Y» параллельна оси вращения панелей солнечных батарей при номинальном положении осей.

2.1.2 Визирная система координат (ВСК) - $Ox_B y_B z_B$.

Оси ВСК материализуется нормальями к граням контрольно-юстировочного элемента, установленного на платформе командных приборов БКУ у основания антенны КРТ. В номинальном положении одноименные оси ВСК и БССК взаимно параллельны и совпадают по направлению.

2.1.3 Связанная система координат КА (СвСК) - $O_{CB}X_{CB}Y_{CB}Z_{CB}$

Начало СвСК располагается в центре масс КА. Оси СвСК параллельны одноименным осям БССК и совпадают с ними по направлению.

2.2 Ограничения по служебным системам КА

2.2.1 Система обеспечения теплового режима (СОТР):

угол между осью « X_{CB} » и направлением на центр диска Солнца должен лежать в диапазоне $90-165^\circ$ в полуплоскости $X_{CB}OZ_{CB}$ (« $+Z_{CB}$ »), выход вектора центра диска Солнца из плоскости $X_{CB}OZ_{CB}$ не должен превышать $\pm 10^\circ$. Значения приведенных углов могут уточняться в процессе ЛКИ.

2.2.2 Система энергоснабжения (солнечные батареи):

угол между направлением с КА на центр диска Солнца и нормалью к плоскости панелей солнечной батареи не должен превышать 10° .

Примечание – Панели солнечной батареи могут вращаться вокруг оси « Y_{CB} », минимизируя угол между направлением с КА на центр диска Солнца и нормалью к плоскости панелей солнечной батареи.

2.2.3 Звездный прибор АД-1 (1, 0, 2)

2.2.3.1 В состав БКУ входят три звездных прибора АД-1: АД-1(1), АД-1(0) и АД-1(2). Оси двух звездных приборов АД-1(1) и АД-1(2) расположены в полуплоскости, отвернутой от полуплоскости $Y_{B}OZ_{B}$ (« $Z_{B}<0$ ») вокруг оси « Y_{B} » на угол 15° в сторону оси « $-X_{B}$ » под углом 45° к осям « $-Y_{B}$ » и « Y_{B} », соответственно (отсчет в сторону оси « $-Z_{B}$ »). Ось третьего звездного прибора АД-1(0) расположена в плоскости $X_{B}OZ_{B}$ и отвернута от оси « $-X_{B}$ » на 30° в сторону оси « $-Z_{B}$ ».

В штатном режиме используются два звездных прибора.

2.2.3.2 Угол между осью каждого из двух рабочих звездных приборов и мешающим небесным телом должен превышать:

- для Солнца - 40° (по центру);
- для Луны - 30° (по центру);
- для Земли - 30° (по ближайшему краю).

Примечание – При формировании программы исследований во время полета выбор рабочих звездных приборов должен производиться из числа разрешенных к использованию и с учетом приведенных в данном протоколе ограничений. Номера звездных приборов, которые могут использоваться, будут сообщаться службой БКУ постановщикам научных экспериментов перед началом планирования.

2.2.4 Остронаправленная антенна "борт - Земля" (ОНА)

2.2.4.1 В приводе ОНА реализованы приборная (ПСК) и подвижная (ПдСК) правые СК.

ПСК ($OX_{П}Y_{П}Z_{П}$) привода материализована посадочной плоскостью, которой привод устанавливается на КА и системой классных отверстий конструкции привода. Номинальное угловое положение ПСК привода ОНА относительно ВСК определяется углами F_x, F_y, F_z , которые отчитываются следующим образом:

после совмещения осей ПСК привода с одноименными осями ВСК производятся последовательные развороты ПСК на углы F_x , F_y , F_z вокруг осей $Ox_{п}$, $Oy_{п}$, $Oz_{п}$ соответственно. Положительное направление вращения – против часовой стрелки при наблюдении с положительного конца соответствующей оси ПСК. Значения углов для номинального углового положения ПСК привода ОНА:

$F_x = 0^\circ$, $F_y = -162,5^\circ$, $F_z = 0^\circ$ (рисунок 2).

Привод обеспечивает развороты ПдСК относительно ПСК на заданные углы $\psi_{пр}$ (вокруг оси $Y_{вр}$, параллельной оси $OY_{п}$ и направленной в ту же сторону) и $\vartheta_{пр}$ (вокруг оси $Z_{вр}$, параллельной оси $OZ_{пд}$ и направленной в ту же сторону) (рисунок 3).

За положительное направление вращения привода вокруг осей $Y_{вр}$ и $Z_{вр}$ принимается вращение против часовой стрелки, если смотреть с положительного направления оси $Y_{вр}$ и $Z_{вр}$, соответственно. За нулевое положение привода по обеим осям вращения принимается положение, при котором ось $Ox_{пд}$ ПдСК параллельна и совпадает по направлению с осью $Ox_{п}$ ПСК. Допустимая область углов поворота привода по каждой из осей составляет:

- по углу $\psi_{пр}$ – от минус 73° до плюс 90° ;

- по углу $\vartheta_{пр}$ – от минус 90° до плюс 90°

ОНА устанавливается жестко на выходном фланце привода ОНА таким образом, что ее ось в номинальном положении отклонена от оси «+X» ПдСК на угол $12,5^\circ$ в плоскости $Ox_{пд} Z_{пд}$ в сторону оси «-Z» ПдСК. В процессе полета этот угол может уточняться.

2.2.4.2 При проведении радиосвязи через ОНА по линии КА-наземная станция слежения (НС-С):

- вектор линии визирования КА-НС-С должен находиться внутри области допустимых угловых положений оси ОНА;
- угловые скорости по каждой из осей привода не должны превышать при прецизионной стабилизации и при юстировке научной аппаратуры $0,1^\circ/\text{с}$;
- в процессе переориентации КА с одного источника на другой требования к точности наведения ОНА не предъявляются;
- угловые скорости по каждой из осей привода при юстировке ОНА ВИРК КА за счет изменения направления линии визирования КА – НС-С не должны превышать $0,0001^\circ/\text{с}$;
- дальность КА от НС-С должна быть больше 5000 км;
- суммарный угол поворота привода по каждой оси вращения, включая подготовительные развороты привода ОНА, должен быть не более 250° за каждые сутки (или 7000° за каждый месяц) при штатной эксплуатации.

Примечание – Под подготовительными разворотами понимается суммарный угол поворота привода ОНА по каждой из осей на участке от окончания предыдущей ориентации и до начала следующей ориентации КА.

2.3 Ограничения по бортовой научной аппаратуре

2.3.1 Система охлаждения малощумящих усилителей - микрокриогенная система (МКС)

2.3.1.1 Угол между осью «- $Z_{св}$ », характеризующей пространственную ориентацию МКС, и направлением на центр диска Солнца должен превышать 90° .

2.3.1.2 Солнце не должно засвечивать поверхность радиатора СТР "холодной" плиты. Радиатор расположен на поверхности усеченного конуса с углом полураствора,

равным 30° , с осью, совпадающей с осью «+X_{св}», и занимает часть боковой поверхности, ограниченной двугранным углом $60^\circ (\pm 30^\circ)$ относительно оси «- Z_{св}»).

2.3.1.3 При геоцентрических дальностях КА меньше 20000 км угол между осью «- Z_{св}» и направлением на центр диска Земли должен превышать 30° .

2.3.2 Радиоастрономические бортовые приемники и антенна КРТ

2.3.2.1 Угол между направлением на центр Солнца и осью «+X_{св}» должен превышать 90° .

2.3.2.2 Угол между направлением на центр Луны и осью «+X_{св}» должен превышать 5° .

2.3.2.3 Угол между направлением на ближайший край диска Земли и осью «+X_{св}» должен превышать 5° .

3. ОГРАНИЧЕНИЯ ПО НАЗЕМНЫМ СРЕДСТВАМ УПРАВЛЕНИЯ, ПРИЕМА НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ И НАЗЕМНЫМ РАДИОТЕЛЕСКОПАМ

Под углом места КА (или исследуемого источника) понимается угол между вектором «наземная станция – КА (или исследуемый источник)» и местным горизонтом.

3.1 Ограничения на ориентацию антенн наземных станций управления (НС-У)

- Угол места КА должен превышать 7° .
- Угол «Солнце-антенна НС-У-КА» должен превышать 10° .
- Угол «Луна-антенна НС-У-КА» должен превышать 5° .

Геоцентрические координаты НС-У и максимальные угловые скорости по азимуту $d\psi/dt$ и углу места dh/dt приведены в таблице 1.

Таблица 1

НС-У	X (км)	Y (км)	Z (км)	Dpsi/dt (угл. мин/с)	Dh/dt (угл. мин/с)
Евпатория Антенна П-2500	3766.8685	2469.5888	4500.7146	4.0	2.0
Медвежьи озера Антенна КТНА-1500	2828.5603	2206.0734	5256.3892	90.0	60.0
Уссурйск Антенна П-2500	-3059.7216	3427.2530	4409.4808	4.0	2.0

3.2. Ограничения на ориентацию антенн НС-С

- Угол места КА должен превышать 10° .
- Угол «Солнце-НС-С-КА» должен превышать 10° .
- Угол «Луна-НС-С-КА» должен превышать 5° .

Геоцентрические координаты НС-С и максимальные угловые скорости по азимуту $d\psi/dt$ и углу места dh/dt приведены в таблице 2.

Таблица 2

НС-С	X (км)	Y (км)	Z (км)	Dpsi/dt (угл. мин/с)	Dh/dt (угл. мин/с)
Пушино	2916.9559	2248.6500	5190.0927	1.5	1.5
Green Bank	882.8799	-4924.4823	3944.1307		
Tidbinbilla	-4460.8946	2682.3616	-3674.7486		

3.3. Ограничения для наземных радиотелескопов (НРТ)

- Угол места исследуемого источника должен превышать 10° .
- Угол “Солнце-НРТ-исследуемый источник” должен превышать 10° .
- Угол “Луна-НРТ-исследуемый источник” должен превышать 5° .

Наземные радиотелескопы условно разделяются на большие (диаметр 32-64 м) и малые (диаметр 22-32 м), в соответствии с размером антенн. Информация об используемых НРТ берется из файла “stations.lst”, формируемого АКЦ ФИАН.

4. ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ КА

Переориентация КА, кроме случаев, оговоренных в п. 4.7, осуществляется методом «конечного поворота» - одного поворота вокруг оси, угловое положение которой относительно визирной и инерциальной систем координат в процессе поворота неизменно. После переориентации электрическая ось антенны КРТ должна быть ориентирована на новый исследуемый источник.

При выполнении переориентации КА должны выполняться следующие условия.

- 4.1 Угол между направлением на центр Солнца и осью « $-Z_{CB}$ » должен быть больше 90° .
- 4.2 Угол между направлением на центр Солнца и осью « $+X_{CB}$ » должен быть больше 60° .
- 4.3 Если при переориентации радиоастрономические приемники не отключены, необходимо учитывать ограничения по Луне и Земле (см. п.п. 2.3.2.2 и 2.3.2.3). В остальных случаях данным ограничением можно пренебречь.
- 4.4 Солнце не должно засвечивать поверхность радиатора СТР "холодной" плиты (см. п.п.2.3.1.2)
- 4.5 Угол между осью каждого звездного прибора и ближайшим краем Земли и Луны, а также направлением с КА на центр Солнца должен быть не менее 10° .
- 4.6 Допустимый угол отклонения направления с КА на центр Солнца от плоскости $X_{CB}OZ_{CB}$ – не более 10° .
- 4.7 В случае невозможности выполнения требований п.п. 4.1 - 4.5 при переориентации методом «конечного поворота» она может быть выполнена с помощью двух или более последовательных разворотов. При этом в каждом из разворотов должны выполняться требования п.п. 4.1 - 4.6.

Примечания –

- В случаях, если угол переориентации не превышает 10° , требуемая по ТЗ точность обеспечения заданной ориентации достигается через 150 с после переориентации. В противном случае – через 30 минут.
- При всех переориентациях должно обеспечиваться непрерывное наведение ОНА на рабочую НС-С. В отдельных случаях допускается невыполнение этого требования.
- При поиске Солнца (осуществляется после выведения КА на рабочую орбиту и в случае аварийных ситуаций) допускается нарушение всех ограничений, указанных в данном протоколе.

5. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

При проведении наблюдений предполагается, что ограничения, сформулированные в разделах 2 и 3 настоящего протокола, выполняются.

5.1 Научные наблюдения

При проведении научных наблюдений необходимо выполнение следующих условий.

5.1.1 Видимость исследуемого источника с КА.

5.1.2 Видимость исследуемого источника как минимум с трех НРТ одновременно, причем два из них должны быть большими, а третий может быть малым.

5.1.3 Видимость КА с одной из станций слежения.

Примечание – Научные наблюдения могут прерываться:

- для проведения внешнетраекторных измерений;
- для передачи команд во время сеанса управления;
- для перехода с одной НС-С на другую;
- для разгрузки комплекса управляющих двигателей – маховиков (КУДМ) БКУ с помощью двигателей стабилизации;
- при прохождении тени от Земли или Луны.

Времена и моменты этих операций будут определены позднее.

5.2 Режим юстировки и калибровки коэффициента усиления антенны КРТ

5.2.1 Операция юстировки в полете осуществляется сканированием антенной КРТ в окрестности юстировочного источника (астрономический объект) путем программного углового движения КА из заданного исходного положения с одновременным приемом с помощью КРТ сигнала этого источника, передачи на Землю получаемой с помощью КРТ информации, а также ТМИ БКУ об ориентации КА.

5.2.2 Юстировка КРТ проводится при наличии видимости юстировочного источника с КА во время видимости КА с НС-У. При работе на частоте 22 ГГц должна быть также обеспечена видимость КА с НС-С.

- 5.2.3 При юстировке КРТ наведение ОНА на НС-С необходимо выполнять только при длине скана не более 7 градусов с учетом ограничений, изложенных в п.п. 2.2.4.2.
- 5.2.4 При выполнении юстировки КРТ должны учитываться ограничения на ориентацию КА, изложенные в настоящем Протоколе.
- 5.2.5 Список юстировочных источников и их координаты приведены в таблицах 4 и 5.

5.3 Режим юстировки ОНА ВИРК КА

- 5.3.1 Юстировка ОНА ВИРК в полете заключается в определении систематической составляющей погрешности наведения электрической оси ОНА для последующей выдачи с Земли соответствующих поправок в БКУ КА.
- 5.3.2 При проведении юстировки должны учитываться ограничения, изложенные в п.2.2.4 настоящего Протокола.

6. Условия проведения сеансов лазерной дальнометрии

При проведении баллистических расчетов используются следующие исходные данные:

- 6.1 В качестве возможных наземных станций для проведения сеансов лазерной дальнометрии могут использоваться станции, приведенные в таблице 3:

Таблица 3

№ п/п	Станция лазерной дальнометрии	Широта	Долгота	Максимальная дальность работы, тыс. км
1	Обсерватория MacDonald (США)	30,68° N	104,02° W	400
2	Обсерватория Grasse (Франция)	43,75° N	6,92° E	400
3	Станция Wrightwood (США)	34,38° N	117,68° W	400
4	Станция Матера (Италия)	40,6° N	16,7° E	100
5	Станция Yarragadee (Австралия)	29,0° S	115,3° E	100
6	Станция Mount Stromlo (Австралия)	35,3° S	149,0° E	100
7	Станция Wettzell WRLS (Германия)	49,14° N	12,88° E	100
8	Российская станция на Кавказе	43,6° N	41,1° E	400
9	Обсерватория Apache Point (США)	31,2° N	103,6° W	400

6.2 При расчете возможных интервалов проведения сеансов лазерной дальнометрии принимаются следующие условия проведения этих сеансов:

- Угол места КА над горизонтом соответствующей станции лазерной дальнометрии должен быть $>30^\circ$;
- Угол между направлениями с КА на Солнце и на станцию лазерной дальнометрии должен быть $>15^\circ$;
- Угол места Солнца над горизонтом соответствующей станции лазерной дальнометрии должен быть $<-10^\circ$;
- Время сеанса лазерной дальнометрии должно быть не более 1 часа;
- В середине сеанса лазерной дальнометрии связанная ось «-X» КА направлена на Землю, при этом за время проведения сеанса лазерной дальнометрии угол между связанной осью «-X» КА и вектором КА – Земля должен быть не более 3° ;
- Должны учитываться ограничения на ориентацию КА, изложенные в настоящем Протоколе

Таблица 4 – Список основных юстировочных источников

Название	α_{2000}	δ_{2000}	S_{327} (Ян)	S_{1665} (Ян)	S_{4830} (Ян)	S_{22235} (Ян)
Телец А (ЗС 144)	05 ^h 34 ^m 30 ^s .94	22°00'26".3	1270	900	650	410
ЗС 273	12 29 06.70	02 03 08.6	65	35	35	32
Дева А (ЗС 274)	12 30 49.61	12 23 35.1	750	185	75	20
Лебедь А (ЗС 405)	19 59 28.54	40 44 14.3	6070	1320	380	60
Кассиопея А (ЗС 461)	23 23 26.92	58 49 32.1	6440	1840	810	250

Таблица 5 – Список основных мазерных юстировочных источников (22 ГГц)

Название	α_{2000}	δ_{2000}	V_{LSR} (км/с)	S_{22235} (Ян)
W3(OH)	02 ^h 27 ^m 04 ^s .69	61°52'25".5	-48	4000
Ori KL	05 35 14.48	-05 22 29.6	11	4500
NGC 6334	17 20 53.45	-35 47 01.5	-9	3200
W 49N	19 10 13.40	09 06 14.3	10.3	100000
Sep A	22 56 17.83	62 01 46.3	-8.4	2400

7. Принятые сокращения

БССК – Базовая строительная система координат
БКУ – Бортовой комплекс управления
ВИРК – Высокоинформативный радиокомплекс
ВСК – Визирная система координат
КРТ – Космический радиотелескоп
КА – Космический аппарат
КУДМ – Комплекс управляющих двигателей-маховиков
ЛКИ – Летно-конструкторские испытания
МКС – Микрокреогенная система
НРТ – Наземный радиотелескоп
НС-С – Наземная станция слежения
НС-У – Наземная станция управления
ОНА – Остронаправленная антенна
СвСК – Связанная система координат
ПСК – Приборная система координат
ПдСК – Подвижная система координат
СОТР – Система обеспечения теплового режима
СТР – Система терморегулирования
ТМИ – Телеметрическая информация

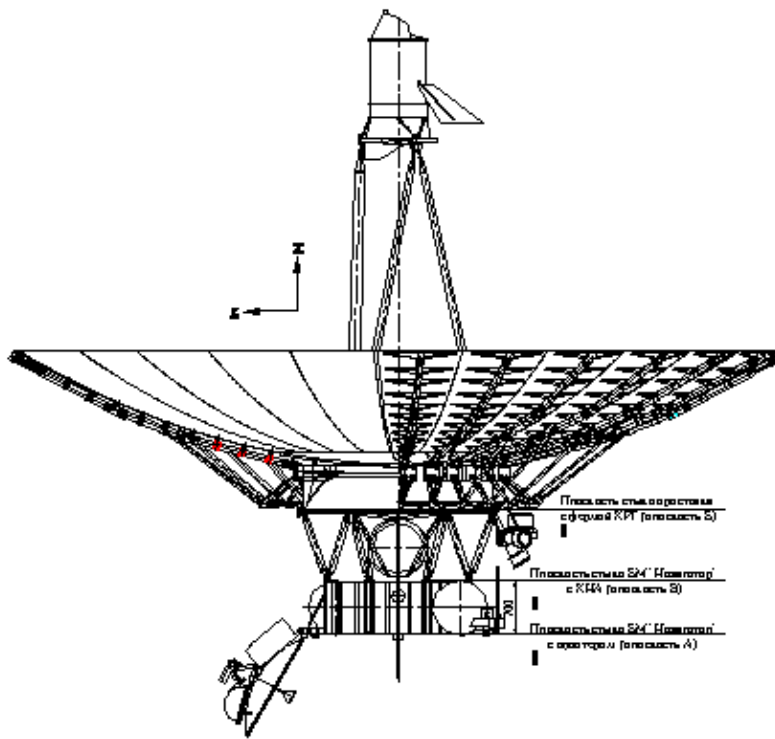


Рисунок 1

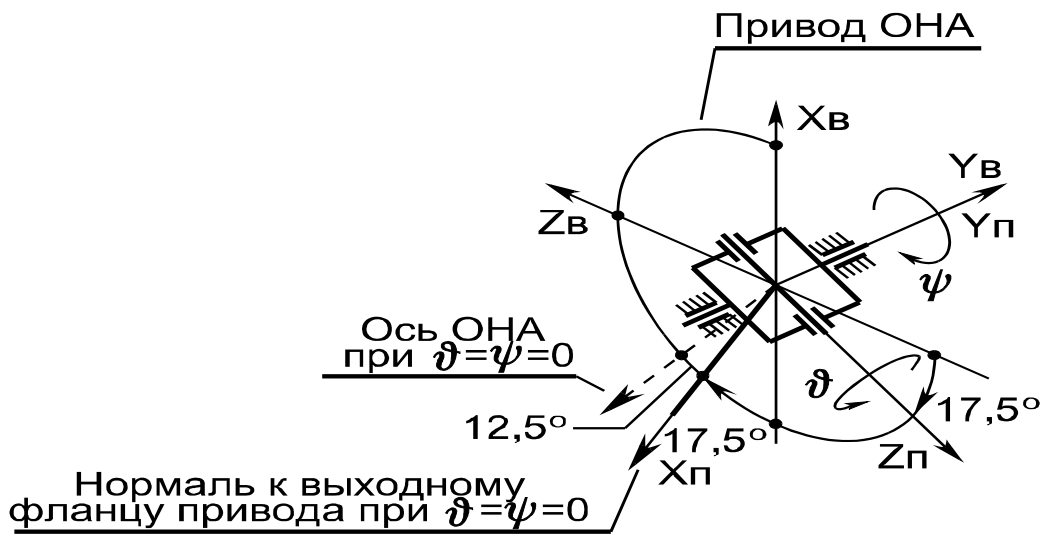


Рисунок 2 – Схема расположения осей ПСК привода ОНА

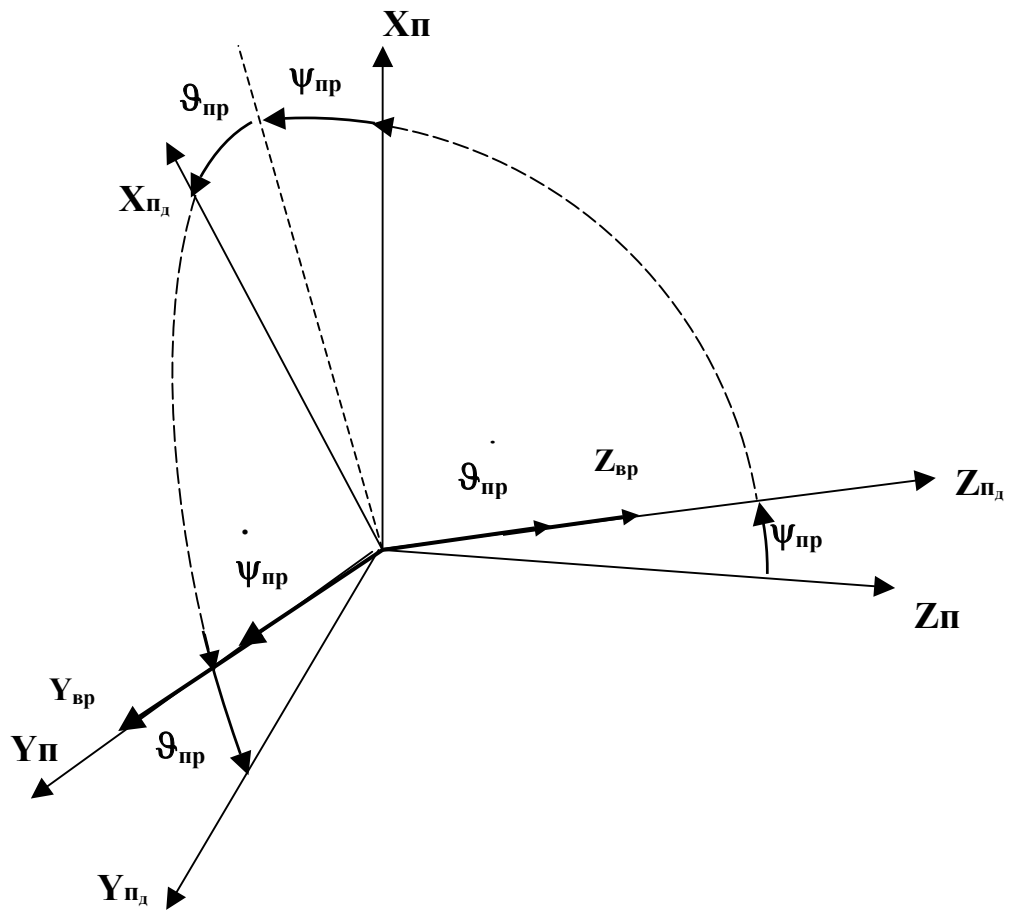


Рисунок 3 - Схема отсчета углов поворота привода ОНА

ПРОТОКОЛ
функциональных ограничений на ориентацию
бортовых и наземных средств проекта РадиоАстрон

118-5-СР-03-11

От НПО им.С.А.Лавочкина

_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /

От АКЦ ФИАН

_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /
_____ / _____ /	_____ / _____ /	_____ / _____ /