

**ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ АНТЕНН  
КОРРЕЛЯЦИОННО-ФАЗОВЫХ ПЕЛЕНГАТОРОВ НА ФАЗОВУЮ  
ПОГРЕШНОСТЬ КАЛИБРОВКИ И РАСКРЫТИЕ  
НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Р. С. Калёнов  
НИУ МЭИ**

Статья получена 4 июля 2014 г.

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние расположения калибровочных антенн корреляционно-фазовых пеленгаторов (КФП) с параболическими приемными антеннами на невязку точной и промежуточной шкал пеленгатора. Предложен возможный вариант размещения калибровочных антенн, приводящий к снижению невязки шкал, и как следствие - к лучшему раскрытию неоднозначности фазовых измерений.

**Ключевые слова:** пеленгатор, фазовые измерения, мониторинг положения космических аппаратов.

**Abstract.** In this paper the influence of the placement of calibration antennas of correlation and phase direction finder with paraboloid receiving antennas on deficiency of precision and intermediate scales of directionfinder is investigated. Possible way of placement of calibration antennas is proposed. It brings to decreasing of the deficiency of scales, and as a result to better disclosure of the variability of phase measurements.

**Key words:** direction finder, phase measurements, monitoring of spacecraft coordinates.

**Введение**

В настоящее время задача мониторинга космических аппаратов (КА) является важной и актуальной задачей. Осуществление независимого и непрерывного орбитально-частотного мониторинга с требуемыми точностью и оперативностью необходимо для проверки управляющими КА операторами

соблюдения требования Международного Союза Электросвязи и обеспечения безопасного функционирования нескольких КА в окрестностях общей точки стояния.

Наиболее эффективный подход к решению перечисленных задач связан с применением специальных измерительных средств и особой обработки соответствующих сигналов. Определенными достоинствами среди таких средств обладают корреляционно-фазовые пеленгаторы (КФП). Основные достоинства малобазовых (однопунктных) радиопеленгаторов, определяющие их разнообразное применение, заключаются в следующем [1-9]:

- широкий диапазон частот принимаемых сигналов произвольной формы;
- высокая чувствительность пеленгатора, обусловленная корреляционной схемой обработки сигналов при разнесенном приеме;
- высокая точность измерений взаимного запаздывания сигналов, обеспечивающая существенное увеличение точности измерения угловых координат КА по сравнению с использованием одноантенных радиотехнических систем;
- возможность осуществлять надежный контроль частотных характеристик принимаемого от КА сигнала.

Типичным образцом КФП является КФП «Ритм» и «Ритм-М», разработанные ОКБ МЭИ [6,9,10]. Схема расположения приемных антенн на антенном поле, изображена на рис. 1.  $A_{PX.PY}$  -измерительные антенны точной шкалы,  $A_{IX.IY}$  -измерительные антенны промежуточной шкалы,  $A_{c0}$  - калибровочная антенна.  $R_i$  - соответствующие расстояния между антеннами. Рабочий диапазон частот КФП «Ритм» составляет 1-4 ГГц. База точной шкалы ( $B_{PS}$ ) в КФП «Ритм» составляет 50 метров, База промежуточной шкалы ( $B_{IS}$ ) вычисляется по соотношению (1)

$$B_{IS} = B_{PS} \cdot \frac{p}{q}, \quad (1)$$

где  $p, q$  - целые взаимно простые числа, которые подбираются специальным образом и определяют соотношение баз точной и промежуточной шкалы КФП.

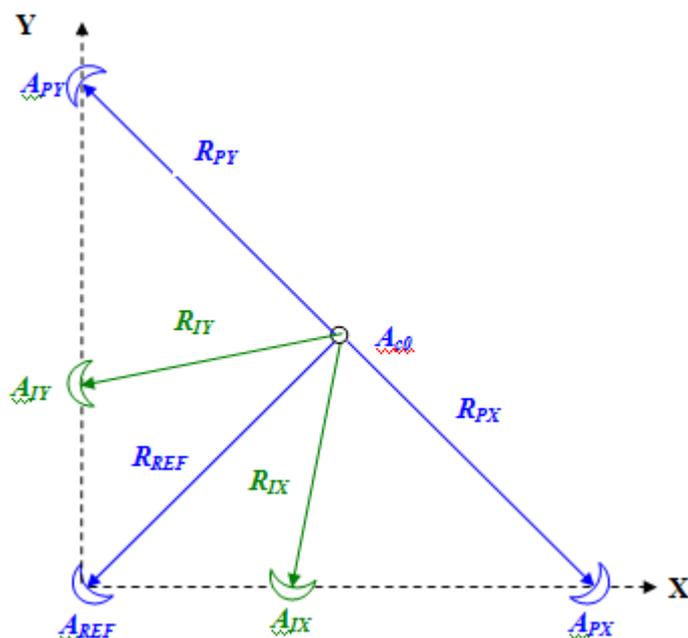


Рис.1 Схема размещения антенн КФП «РИТМ».

Стоит отметить, что раскрытие неоднозначности фазовых измерений в КФП «Ритм» осуществлялось путем подбора некоторых коэффициентов, определяемых в процессе эксплуатации КФП, а также с привлечением дополнительных средств измерения[10]. Есть все основания полагать, что данная проблема вызвана тем, что при проведении предсеансной калибровки, необходимой для обнуления фазовых набегов в приемных трактах КФП, на частотах выше 2-3 ГГц калибровочная антенна находится в зоне Френеля приемных антенн, в которой наблюдаются существенные осцилляции амплитуды и фазы калибровочного сигнала.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к использованию КА все более высоких рабочих частот. Следовательно, растет и потребность в расширении рабочего диапазона частот средств мониторинга положения КА. При этом увеличение рабочей частоты КФП без изменения его размеров и без изменения геометрии антенного поля приведет к расширению области осцилляций, что не позволит решать проблему раскрытия неоднозначности фазовых измерений КФП без привлечения дополнительных средств измерений.

## 2. Основные соотношения и входные данные, используемые для оценки эффекта зоны Френеля при наземной калибровке КФП типа «Ритм».

В двухшкальном КФП с общей опорной антенной при дробнократном отношении баз критерием правильного раскрытия неоднозначности является выполнение условия (2) или (3):

$$\left| q \cdot \frac{\Delta\varphi_{IS}}{2\pi} - p \cdot \frac{\Delta\varphi_{PS}}{2\pi} \right| < 0,5 \quad (2)$$

$$\left| \frac{\Delta\varphi_{DEF}}{2\pi} \right| < \frac{1}{2 \cdot q} \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi_{PS}$  - искажение фазы в шкале ТШ, образованной разностью фаз сигналов,

принимаемых антеннами  $A_P$  и  $A_{REF}$ ; причем  $\Delta\varphi_{PS} = \delta\varphi_P - \delta\varphi_{REF}$ ;

$\Delta\varphi_{IS}$  - искажение фазы в шкале ПШ, образованной разностью фаз сигналов, принимаемых антеннами  $A_I$  и  $A_{REF}$ ; причем

$$\Delta\varphi_{IS} = \delta\varphi_I - \delta\varphi_{REF};$$

$\Delta\varphi_{DEF}$  - параметр «невязки» шкал ТШ и ПШ при раскрытии неоднозначности.

$$\Delta\varphi_{DEF} = \Delta\varphi_{IS} - \Delta\varphi_{PS} \cdot \frac{B_{IS}}{B_{PS}} = \Delta\varphi_{IS} - \Delta\varphi_{PS} \cdot \frac{p}{q} \quad (4)$$

$\delta\varphi_{REF}$  - искажение фазы сигнала, принимаемого антенной  $A_{REF}$ ;

$\delta\varphi_P$  - искажение фазы сигнала, принимаемого антенной  $A_P$ ;

$\delta\varphi_I$  - искажение фазы сигнала, принимаемого антенной  $A_I$ ;

$B_{PS}, B_{IS}$  - расстояния между антеннами соответственно точной и промежуточной шкал (длины антенных баз КФП).

В данном случае «невязки» шкал КФП с общей опорной антенной анализируются без ввода поправок, компенсирующих влияние эффекта зоны Френеля при калибровке:

$$\Delta\varphi_{DEF} = \delta\varphi_I - \delta\varphi_P \cdot \frac{p}{q} - \left(1 - \frac{p}{q}\right) \cdot \delta\varphi_{REF} \quad (5)$$

Все расчеты выполнены методом физической оптики для КФП типа «Ритм» с параметрами:

- $D_a = 3,5$  м;
- диапазон частот 1-17 ГГц;
- $V_{PS} = 50$  м;  $V_{IS} = V_{PS} \cdot p/q$ ;  $p=3$ ;  $q=7$ .
- Критерий для РН  $\left| \frac{\Delta\varphi_{DEF}}{2\pi} \right| < \frac{1}{2 \cdot q} = 0.0714$  или  $|\Delta\varphi_{DEF}| < 25,7$  град.

В качестве точки приема широкодиапазонной направленной антенны принимается фазовый центр ее логопериодического облучателя, положение которого относительно его основания, зависит от частоты принимаемого сигнала (рис.2) и определяется в соответствии с [11].

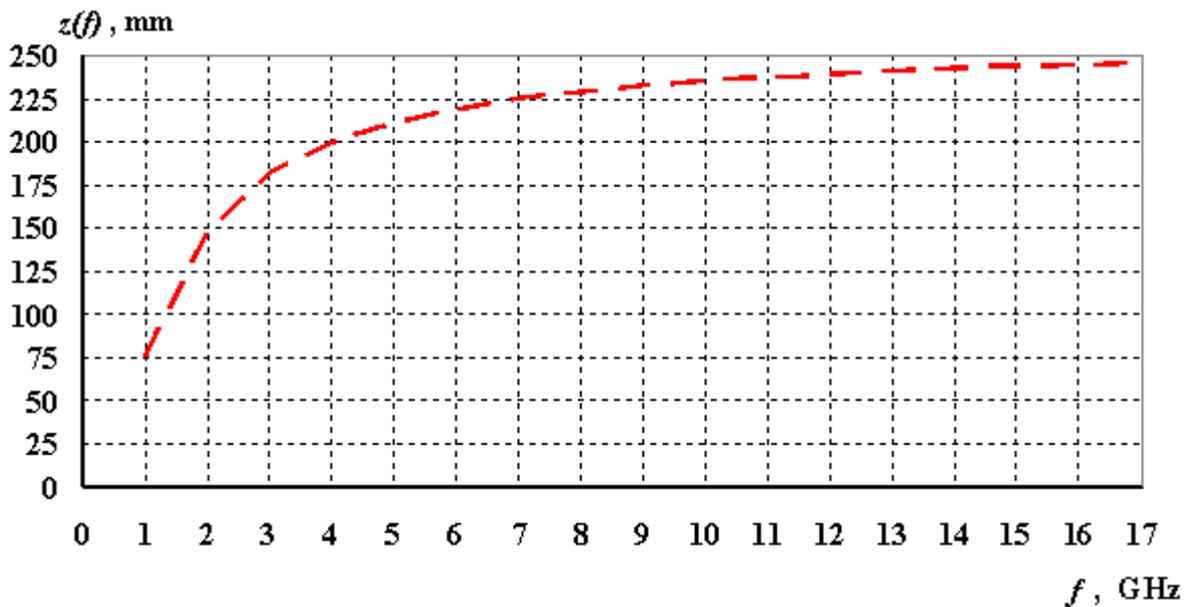


Рис. 2 Смещение фазового центра логопериодического облучателя относительно его основания в зависимости от частоты.

Характеристики распределения поля в раскрывах приемных антенн и оптимальное положение облучателей относительно фокуса определены по результатам настройки и испытаний реальных образцов облучателей. При этом в расчете рассматриваются три варианта амплитудного распределения в раскрыве параболической приемной антенны (рис.3).

Все три варианта рассчитываются по формуле (6) и отличаются только коэффициентам  $k$  ( $p$ - порядковый номер варианта).

$$A_p(x,k) = \left[ \cos \left( k \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2x}{D_a} \right) \right]^2, \quad -D_a/2 \leq x \leq D_a/2. \quad (6)$$

$A_p(x,k)$  - распределение амплитуды поля в раскрытии,

$k$  - параметр распределения,

$x$  - смещение в плоскости раскрытия относительно центра зеркала,

$D_a$  - диаметр раскрытия антенны.

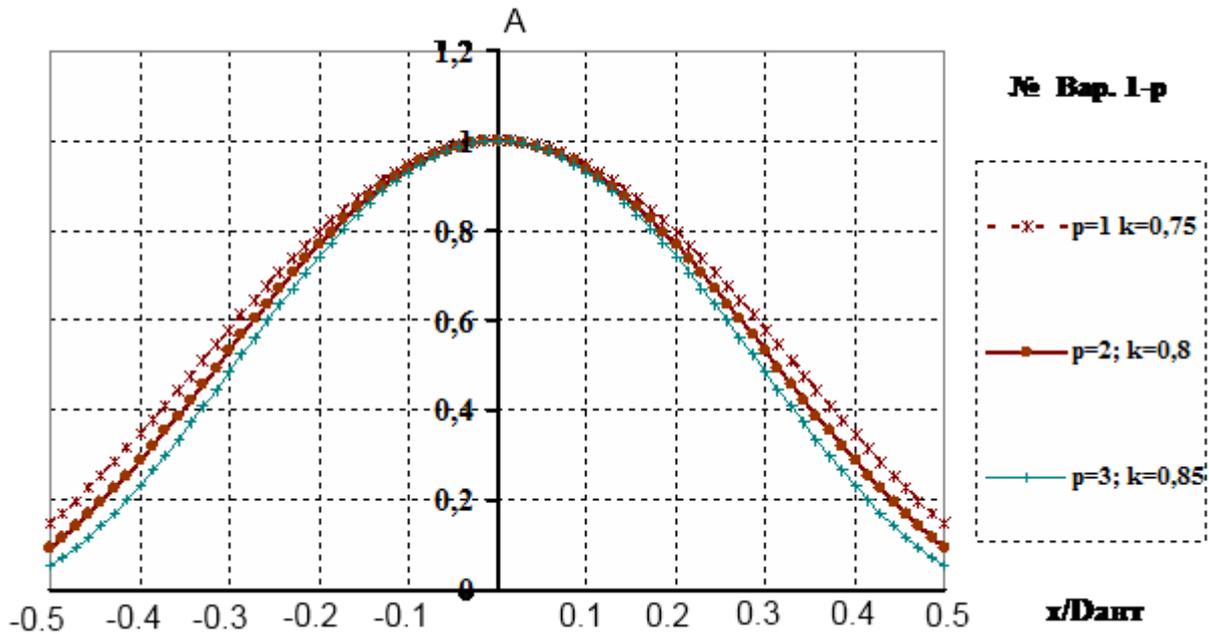


Рис.3 Варианты амплитудного распределения в раскрытии приемной антенны.

Как было сказано выше, основной причиной, по которой КФП типа «Ритм» требовались дополнительные средства измерений для раскрытия неоднозначности, является нахождение калибровочной антенны в зоне Френеля приемных антенн. Необходимо оценить минимальное расстояние, на котором в зоне Френеля возникают осцилляции фазы и амплитуды.

В соответствии с [12] считается, что точка наблюдения находится в дальней зоне антенны при выполнении условия (7):

$$R_{ff} \geq \frac{2 \cdot D_a^2}{\lambda} \quad (7)$$

При этом подчеркивается, что при  $R \leq 0.105 \cdot R_{ff}$  наблюдаются осцилляции амплитуды сформированного антенной поля. С учетом среднего распределения

поля в апертуре зеркальной антенны (вариант  $p=2$  рис.3) по формуле (8) были получены зависимости погрешности амплитуды и фазы поля от расстояния для частот 1-17 ГГц.

$$E(r) = \frac{\int_0^a r \cdot A_p(x) \cdot \frac{e^{-i \cdot k \cdot (\sqrt{x^2 + r^2} - r)}}{\sqrt{x^2 + r^2}} \cdot x dx}{\int_0^a A_p(x) \cdot x dx} \quad (8)$$

,где  $A_p(x)$  - распределение поля в раскрыве антенны;

$x$  - координата вдоль раскрыва;

$k$  - волновое число;

$r$  -расстояние.

Полученные зависимости амплитуды и фазы от расстояния на всех частотах имеют характерный вид, представленный на рис. 4,5.

На рис.4,5 четко видна граница зоны осцилляций (с ростом частоты эта граница сдвигается вправо, в сторону увеличения расстояния от антенны). Также, заметно, что осцилляции фазы прекращаются раньше, чем осцилляции амплитуды, что позволяет расположить калибровочную антенну ближе к измерительным. Теперь необходимо подобрать некий коэффициент  $g$ , который позволит рассчитать границу осцилляций амплитуды и фазы для любой частоты. Результаты расчета приведены в таблице 1.

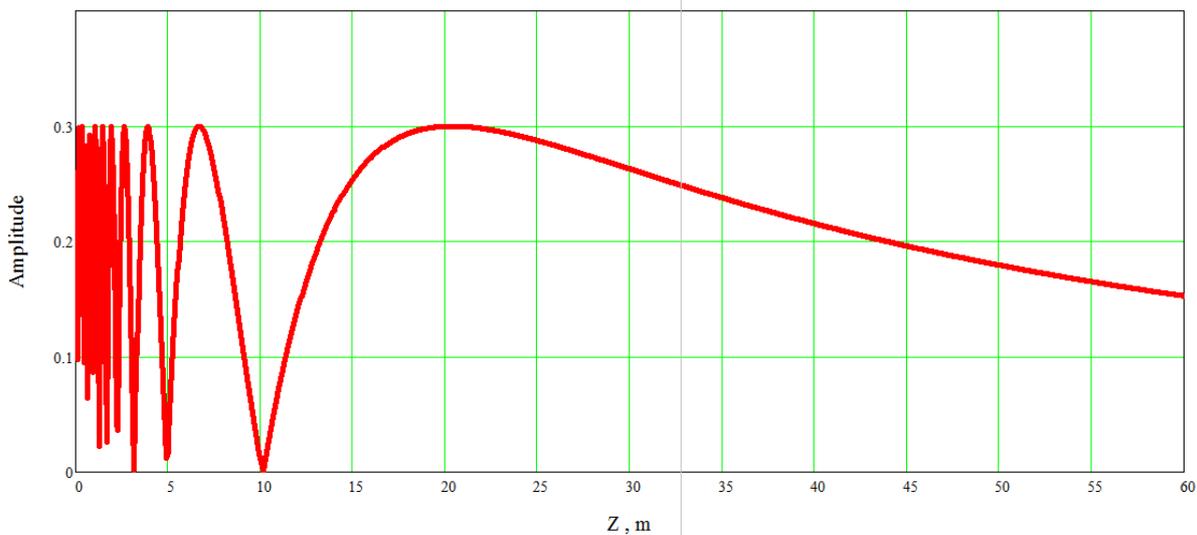


Рис.4 Зависимость амплитуды сигнала от расстояния

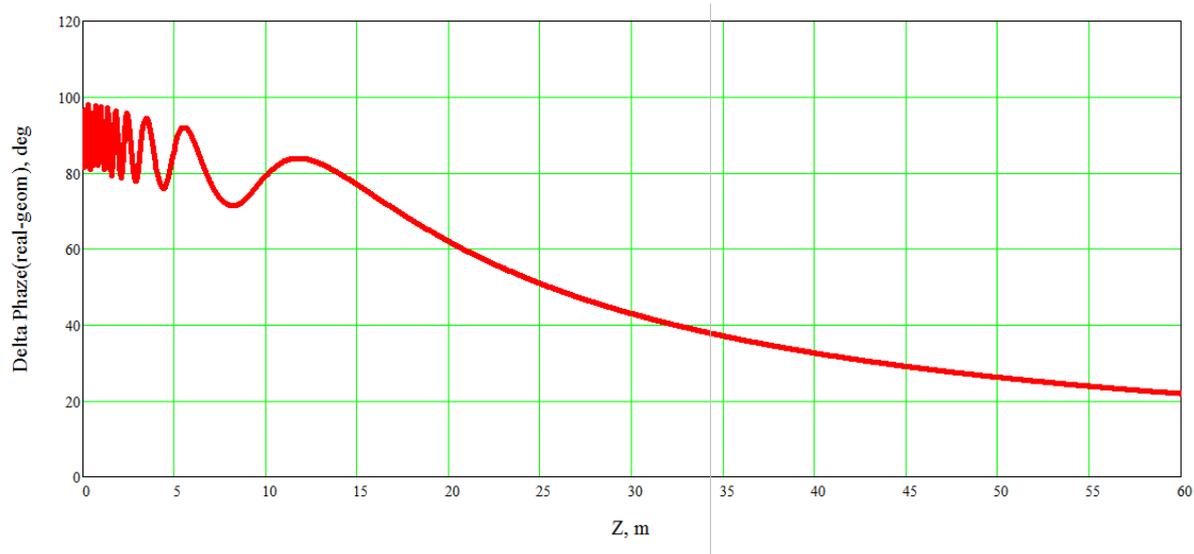


Рис.5 Зависимость фазы сигнала от расстояния

Таблица 1.

F, GHz	$R_{ff} = \frac{2 \cdot D_a^2}{\lambda}, m$	$R_{oscMUK} = 0.105 \cdot R_{ff}, m$	$R_{oscA}, m$	$R_{osc\Phi}, m$
1	81.6	16.3	10.08	6.075
2	163.3	32.6	20.46	11.736
3	245	49	30.6	18
4	326.6	65.3	40.56	23.798
5	408.3	81.6	51	30
6	490	98	61	36
7	571.6	114.3	71.4	42
8	653.3	130.6	81.6	49
9	735	147	92	55
10	816.6	163.3	102	61
11	898.3	179.6	112	66.452
12	980	196	122.4	73
13	1061.6	212.3	132.6	79
14	1143.3	228.6	143	85
15	1225	245	153.6	91
16	1306.6	261.3	164	97
17	1388.3	277.6	174.25	101.34

Исходя из данных таблицы 1, выведем формулы для  $R_{oscA}$  (9) и  $R_{osc\Phi}$  (10).

$$R_{oscA} = 0.125 \cdot R_{nz} = 0.25 \cdot \frac{D_a^2}{\lambda} \quad (9)$$

$$R_{osc\Phi} = 0.073 \cdot R_{nz} = 0.146 \cdot \frac{D_a^2}{\lambda} \quad (10)$$

Для калибровки КФП важнее знать границу осцилляций фазы сигнала, следовательно при поиске альтернативной схемы размещения калибровочных антенн КФП необходимо руководствоваться формулой (10).

### 3. Варианты расположения калибровочных антенн.

#### 3.1 «Типовая» калибровка.

Калибровочная антенна  $A_{c0}$  располагается вблизи центра гипотенузы, соединяющей фазовые центры измерительных антенн (рис.1). Расстояние от антенн ТШ до калибровочной антенны - 35 м, от антенн ПШ – 25 м. Типовая калибровка выполняется одновременно по ТШ и ПШ по обеим координатным осям.

Т.к. рассматриваются три варианта амплитудного распределения в раскрыве параболической приемной антенны, необходимо проанализировать различные комбинации этих распределений для опорной антенны ( $A_{REF}$ ), антенны промежуточной шкалы ( $A_I$ ) и антенны точной шкалы ( $A_P$ ). Все варианты распределений приведены в таблице 2.

Таблица 2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
Параметры КФП = { $B_{ps}=50$ ; ( $p=3$ ; $q=7$ ); $D_a=3,5$ ; $F_{max}=17$ }				
Варианты распределения амплитуды				
	$A_{REF}$	$A_I$	$A_P$	
№№	$R_{REF}=35,4$ м	$R_I=25,2$ м	$R_P=35,4$ м	
рис	№VAR	№VAR	№VAR	
7	(3)	(1)	(1)	3-1-1
8	(3)	(3)	(1)	3-3-1
	(1)	(1)	(1)	1-1-1

6	(2)	(2)	(2)	2-2-2
	(3)	(3)	(3)	3-3-3
9	(1)	(1)	(3)	1-1-3
10	(1)	(3)	(3)	1-3-3

Для начала оценим невязку шкал из-за эффекта, вызванного нахождением калибровочной антенны в зоне Френеля измерительной антенны, для случая, когда распределения во всех трех измерительных антеннах совпадают (рис.6).

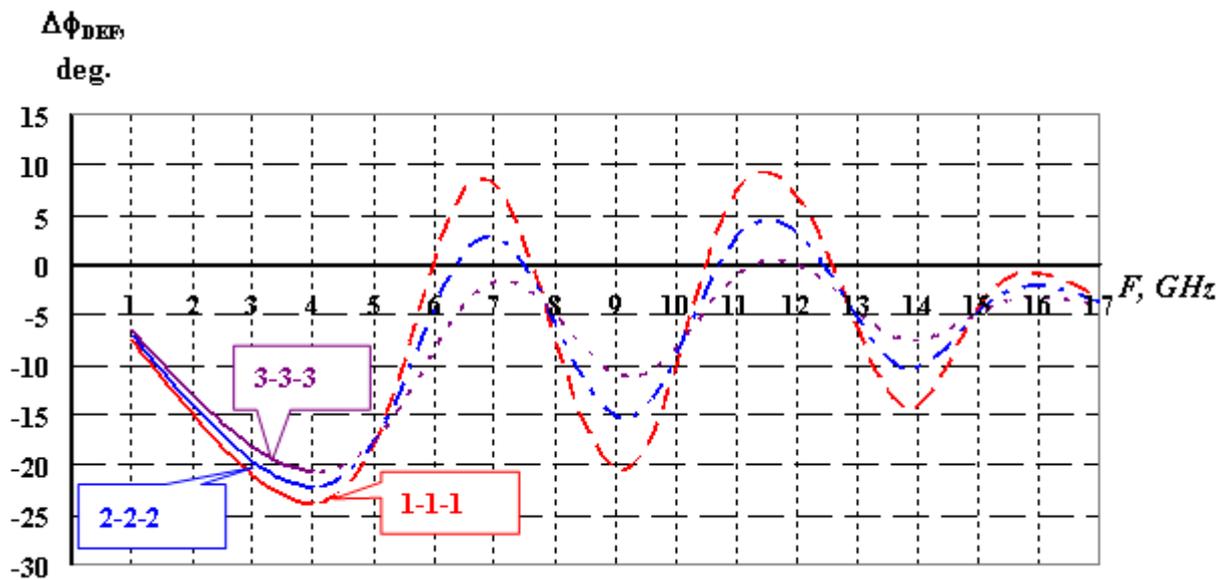


Рис.6 Невязки шкал КФП при одинаковых параметрах функции распределения амплитуды в раскрывах антенн  $A_{REF}$ ,  $A_I$  и  $A_P$  (типовая калибровка). Здесь и далее пунктиром будут строиться графики, лежащие в зоне осцилляций амплитуды и фазы калибровочного сигнала (зоне Френеля)

Как видно из рис.6, невязка шкал для варианта 2-2-2 лежит между невязками вариантов 1-1-1 и 3-3-3. Путем аналогичных расчетов было определено, что при любой комбинации распределений поля в раскрывах приемных антенн, в которой будет принимать участие вариант распределения 2, невязка шкал будет лежать между невязками, рассчитанными по остальным вариантам. Т.к. нам необходимо оценить границы, в которых могут меняться

невязки шкал, мы можем исключить из анализа варианты, в которых участвует амплитудное распределение 2 из таблицы 2.

Примерно до 4 ГГц при всех рассмотренных вариантах распределения сохраняется монотонный (достаточно близкий к линейной зависимости) характер фазовых искажений сигналов, принимаемых антеннами КФП от  $A_{c0}$ . При этом если взглянуть на таблицу 2 видно, что расстояние от калибровочной антенны до измерительной ( $R_{c0}$ ) не превышает  $R_{osc\Phi}$  как раз до частоты в 4 ГГц. На более высоких частотах при фиксированном положении  $A_{c0}$  источник излучения сигнала находится непосредственно в зоне осцилляций измерительных антенн ( $R_{c0} < R_{osc\Phi}$ ) (рис. 6-10), что приводит к резкому изменению характера фазовых искажений, которые приобретают осциллирующий вид.

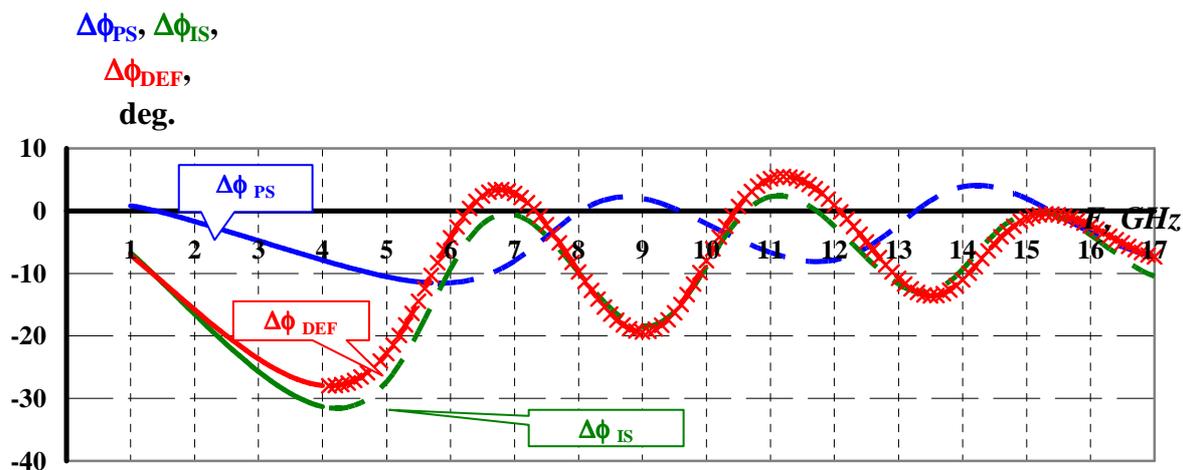


Рис. 7 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 3-1-1 (типовая калибровка).

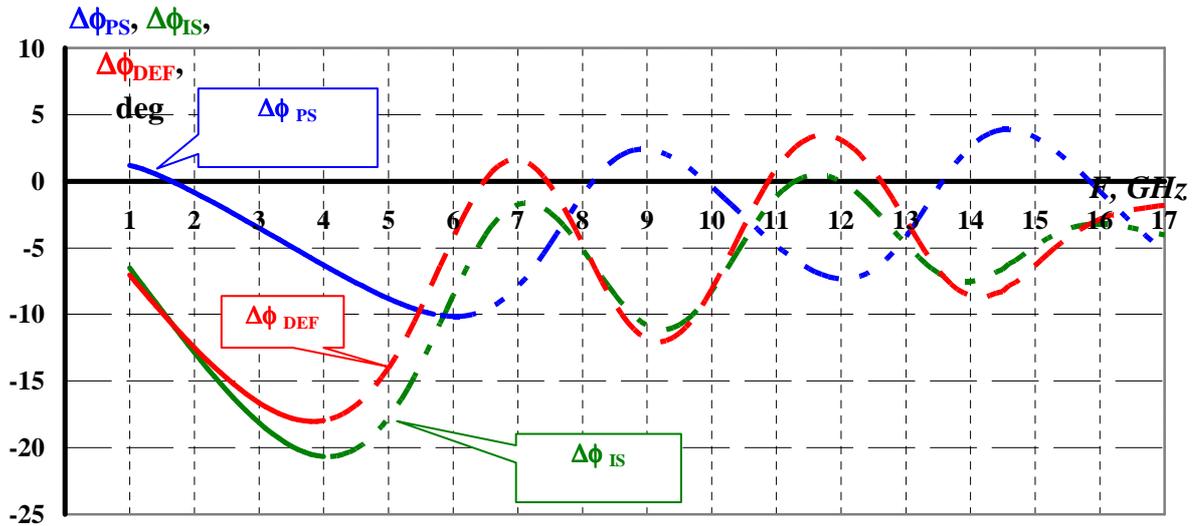


Рис. 8 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 3-3-1 (типовая калибровка).

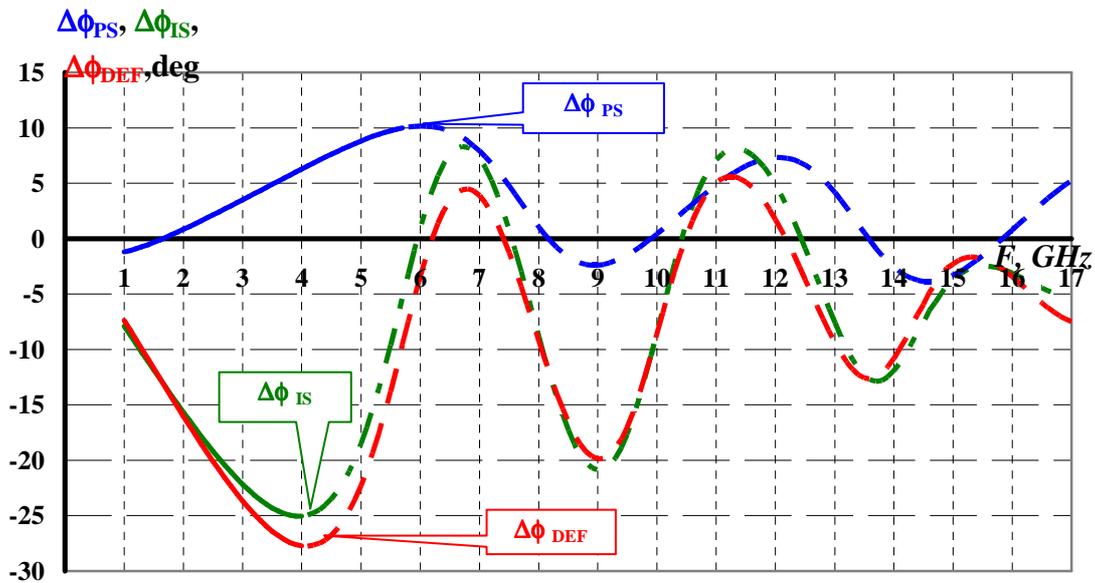


Рис. 9 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 1-1-3 (типовая калибровка).

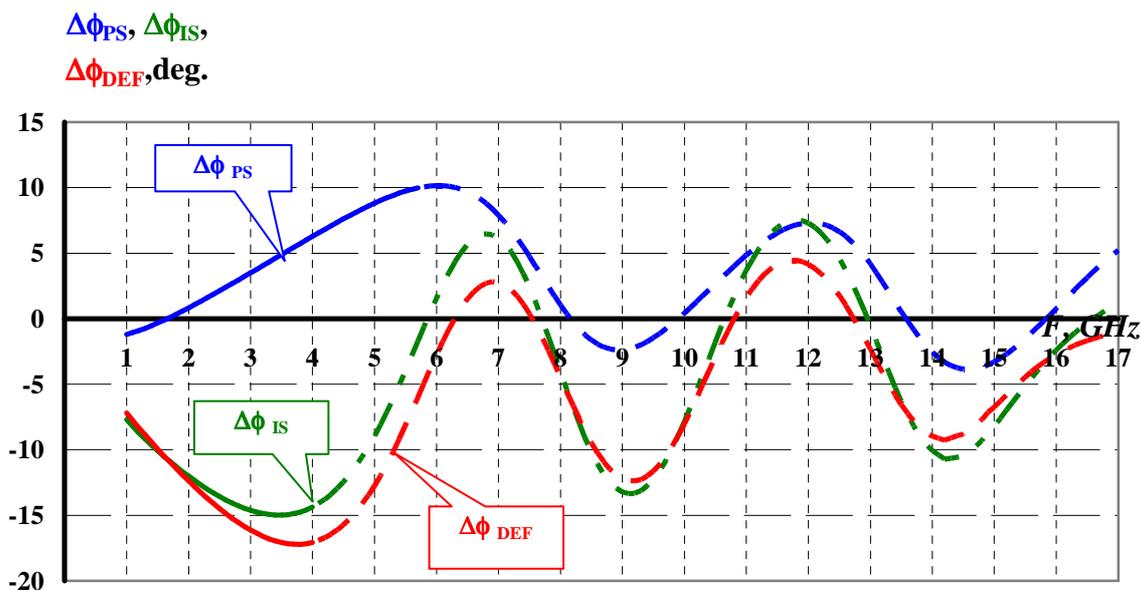


Рис. 10 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 1-3-3 (типовая калибровка).

Из приведенных выше графиков видно, что на монотонном участке (до 4 ГГц) при антеннах с различающимся амплитудным распределением меняются:

- Для ТШ- знак (см. рис.7,9);
- Для ПШ - абсолютное значение фазовой погрешности, вызванной ошибкой, вносимой нахождением калибровочной антенны в зоне Френеля приемных антенн;
- Для невязки шкал - только абсолютное значение фазовой погрешности, вызванной ошибкой, вносимой нахождением калибровочной антенны в зоне Френеля приемных антенн.

При этом, разброс значений невязки точной и промежуточной шкал колеблется от  $19,5^\circ$  (рис. 8,10) до  $31,5^\circ$ - $33^\circ$  (рис. 7,9). Хотя для некоторых комбинаций распределения поля в раскрытие приемных антенн (3-3-1,1-3-3) разброс невязки удовлетворяет условию раскрытия неоднозначности (3) нельзя быть уверенным, что при реальной эксплуатации КФП эти комбинации окажутся именно такими, а не подобными комбинациям 1-1-3, 3-1-1, для которых условие (3) не выполняется. Следовательно гарантировать раскрытие неоднозначности фазовых измерений без привлечения сторонних средств

нельзя, и необходимо предложить альтернативную схему размещения калибровочных антенн КФП.

Также, можно сделать вывод о том, что на частотах выше 4 ГГц можно ожидать значительную зависимость величины рассматриваемой фазовой погрешности от изменения параметров внешней среды (температура, осадки, ветер, отраженные сигналы) и от погрешности наведения измерительных антенн на источник излучения калибровочного сигнала.

### 3.2 «Покоординатная» калибровка

Покоординатная калибровка - использование двух антенн ( $A_{cX}$  и  $A_{cY}$ ), каждая из которых размещается на равном удалении от опорной и точной антенн соответствующей координатной оси (рис.11)

Принимая во внимание результаты оценки эффективности «типовой» калибровки, в данном случае анализ проводится при удалении калибровочных антенн от измерительных на расстояние порядка 100 метров.

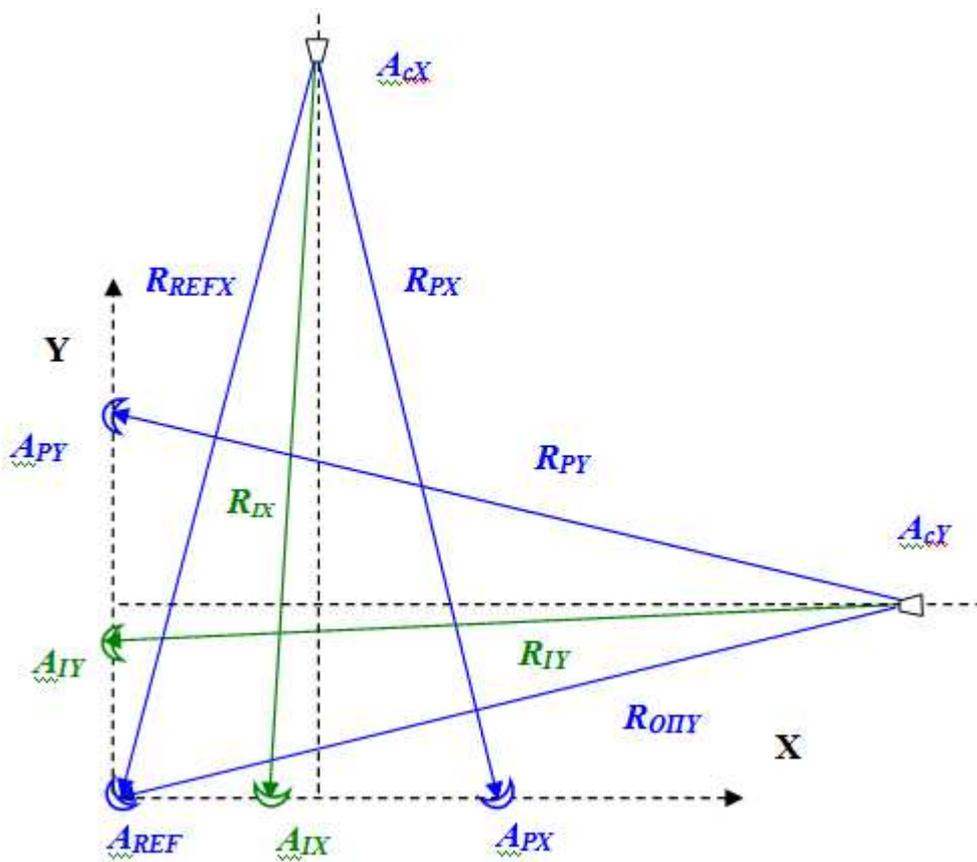


Рис.11 Схема размещения антенн КФП при «покоординатной» калибровке

Так же как и при «типовой» калибровке не будем рассматривать комбинации распределений, включающие в себя вариант 2, а также варианты, с совпадающими распределениями в  $A_{REF}$  и  $A_p$ . Рассматриваемые комбинации амплитудных распределений в приемных антеннах приведены в таблице 3. На рис 12,13 показаны результаты расчета невязок шкал КФП при «покоординатной» калибровке.

Таблица 3.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
Параметры КФП = {50; (3; 7); 3,5; 17}				
Варианты распределения амплитуды				
	$A_{REF}$	$A_I$	$A_p$	
№№	$R_{оп}=103$ м	$R_{п}=100$ м	$R_{т}=103$ м	
рис	№VAR	№VAR	№VAR	
12	(3)	(1)	(1)	3-1-1
13	(1)	(3)	(3)	1-3-3

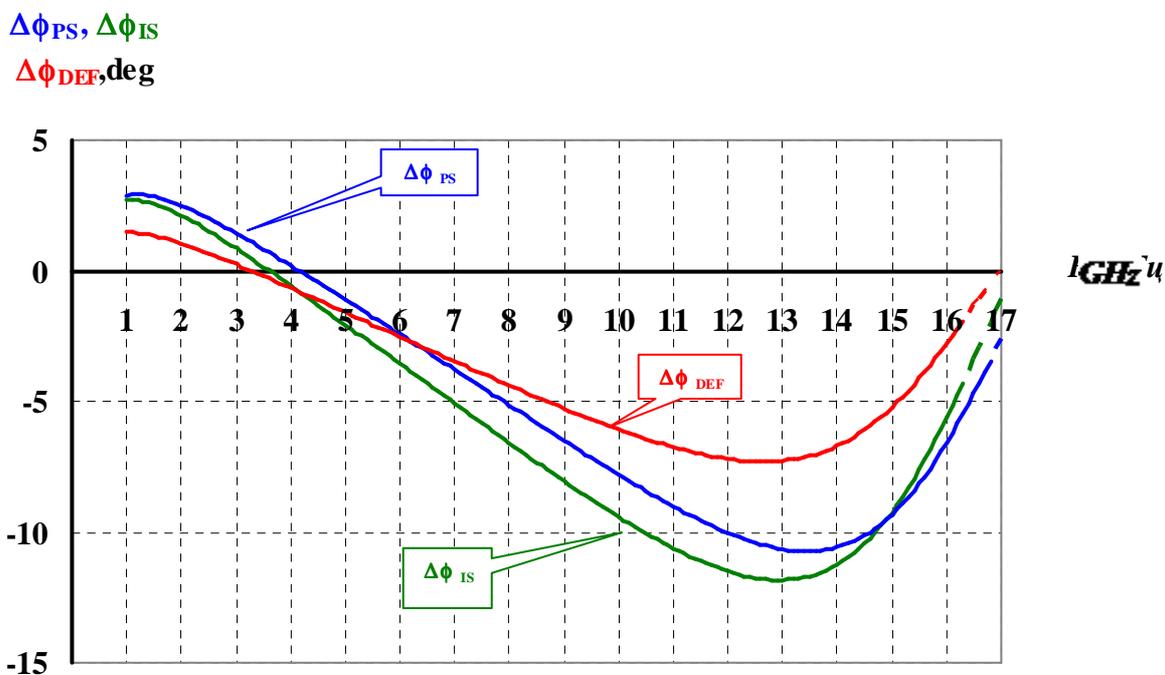


Рис.12 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 3-1-1 (покоординатная калибровка)

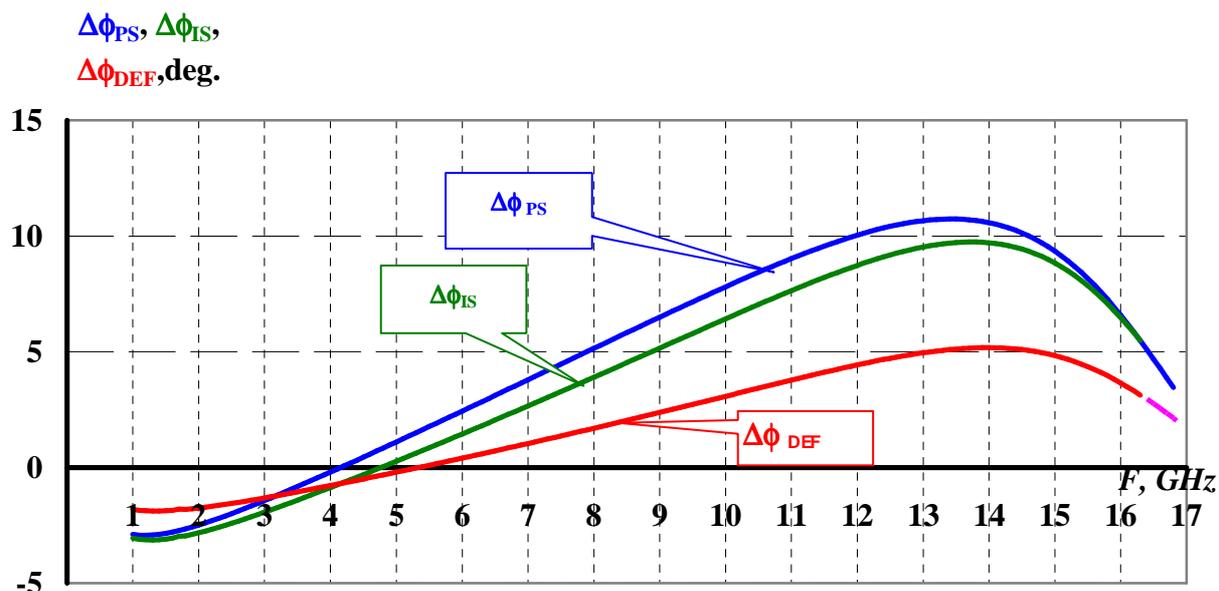


Рис.13 Фазовые погрешности ТШ и ПШ КФП и их невязка для комбинации амплитудных распределений 1-3-3 (покоординатная калибровка)

Из приведенных выше графиков можно сделать следующие выводы:

- При удалении  $A_c$  на 100 – 150 метров значения погрешностей «ближней зоны» меняются незначительно в заданном диапазоне частот, однако следует ожидать усиления влияния сигналов, отраженных от поверхности Земли;
- При удалении на 100 м отмечается монотонный характер изменения фаз принимаемых сигналов примерно до 13 - 14 ГГц; Для сохранения монотонного характера до 17 ГГц минимальное удаление  $A_c$  от измерительных антенн должно быть не менее 140 – 150 м;
- В зависимости от комбинации вариантов распределения меняются практически только знаки погрешностей в ТШ и ПШ, а также знак невязки.
- Условие раскрытия неоднозначности фазовых измерений (3) при использовании «покоординатной» калибровки удовлетворяется при любых распределения поля в раскрывах приемных антенн, что гарантирует правильную работу КФП.

#### 4. Выводы

Сопоставив результаты расчета для двух вариантов размещения антенн КФП, можно заключить, что при использовании «покоординатной» калибровки, величина невязки ТШ и ПШ КФП существенно снижается так, что условие раскрытия неоднозначности (3) становится выполнимым. В первую очередь, это обусловлено вынесением калибровочной антенны от измерительных антенн на расстояние, превышающее  $R_{osc\Phi}$ . При этом фазовые ошибки в каждой шкале имеют монотонный характер, благодаря чему появляется возможность с более высокой точностью рассчитать фазовую поправку, вносимую в приемные тракты КФП.

Также заметно, что на величину невязки в случае «типовой» калибровки наибольшее влияние оказывает фазовая ошибка формируемая в промежуточной шкале. Следовательно, при проектировании подобных КФП необходимо уделять повышенное внимание к точностям установки (а также фокусировки облучателя и наведения на калибровочную антенну) именно приемных антенн промежуточной шкалы.

#### Литература

1. Урличич Ю.М., Махненко Ю.Ю. и др. Современные технологии еавигации геостационарных спутников. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 272 с.
2. Мешков М.Н., Чаплинский В.С. Применение радиолокационного комплекса «Кобальт-РЛС» совместно с радиоинтерферометром «Ритм» для контроля процессов выведения космических аппаратов на геостационарные и высокоэллиптические орбиты // Радиотехнические Тетрали. 2002. №24. с 8-11.
3. Мешков М.Н., Графов А.Ф., Турлов З.Н. и др. Корреляционно-фазовый пеленгатор «Ритм-М» нового поколения // Вестник МЭИ. 2008. № 1. С. 25-32.
4. Мешков М.Н. Малобазовые корреляционно-фазовые радиопеленгаторы типа «Ритм», как средства навигационно-баллистического обеспечения КО различного назначения // Труды НТК «Роскосмос», ФГУП РНИИ КП. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 178 с.

5. Мешков М.Н. Обеспечение режима коллокации геостационарных спутников связи «Экспресс-АМ» // Радиотехнические Тетради. 2009. № 39. С. 61-64.
6. Мешков М.Н. Радиоинтерферометрические средства пункта космической связи «Медвежьи озера» // Радиотехнические Тетради. 1997. № 11. С. 30-39.
7. Мешков М.Н. Построение следящих устройств и согласование шкал в пеленгаторе разнесенного приема широкополосного шумоподобного сигнала // Труды МЭИ. 1982. Вып. 561. с. 9-16.
8. S. Kawase. Radio-Interferometer for geosynchronous orbit survey // J. of Astronautical Sciences. 1999. V. 47. № 2. P. 151-163.
9. S. Kawase and F. Sawasda. Relative Orbit Estimation of Close Geosynchronous Satellites using Differential Radio Interferometer. Communications Research Laboratory, Kashima-Shi, Ibaraki 314 Japan, P. 205-210.
10. [Электронный ресурс] URL: <http://kfp-ritm.ru/index.php>
11. Определение уровней электромагнитного поля, создаваемого излучающими техническими средствами телевидения, ЧМ радиовещания и базовых станций сухопутной подвижной радиосвязи: Методические указания.—М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003.—44 с. МУК 4.3.1677—03// [Электронный ресурс]  
URL: [http://www.fcgsen.ru/DOC/260712/muk\\_1677-03.pdf](http://www.fcgsen.ru/DOC/260712/muk_1677-03.pdf)
12. МУК 4.3.1167-02 Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц. // [Электронный ресурс]  
URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030406>