

УДК 621.396.677

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ДВУХКАНАЛЬНОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ  
НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ОДНИМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ  
НА ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ**

**Н. Ю. Воробьев, Д. Д. Габриэльян, В. И. Демченко, А. А. Косогор,  
Д. Я. Раздоркин, А. А. Саранов**

**Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»  
Федеральный научно-производственный центр**

Получена 14 марта 2013 г.

**Аннотация.** В статье исследуется влияние рассогласования комплексных коэффициентов передачи суммарного и разностного каналов на точность определения угловых координат в моноимпульсной системе с одним рупорным облучателем. Исследования проводятся на основе экспериментальных диаграмм направленности зеркальной антенны с диаметром рефлектора 3.5 м.

**Ключевые слова:** Моноимпульсная система сопровождения, зеркальная антенна, суммарная и разностная диаграммы направленности, пеленгационная характеристика, ошибки определения угловых координат.

**Abstract:** The effect of mismatches of sum and difference transmission channel complex coefficients on direction-finder deviation is investigated. The researches are completed on basis of experimental of results for corrugated horn 3,5 meter reflector antenna.

**Keywords:** Monopulse tracking system, reflector antenna, sum pattern and difference pattern, direction-finding characteristic, direction-finder deviation.

Нахождение большого количества (до нескольких десятков тысяч) космических объектов (КО) в околоземном пространстве вызывает необходимость регулярного контроля их орбит с целью обеспечения

безопасного функционирования активных космических аппаратов (КА). Необходимые точности определения углового положения КО могут составлять величины порядка угловых секунд.

В существующих измерительных комплексах для проведения высокоточных измерений широкое распространение получили интерферометрические методы. Однако массовое применение этих методов в диапазонах частот выше 10 ГГц затруднено из-за стоимости синхронизации, когда сигналы принимаются несколькими горизонтально разнесенными антеннами. Альтернативным вариантом для проведения высокоточных измерений в Ку- и Ка-диапазонах является использование моноимпульсного метода, который при относительно небольших размерах антенн позволяет реализовать точности измерений до единиц угловых секунд.

Для реализации моноимпульсного метода в зеркальных антеннах в основном используются два способа: на основе четырех облучателей с последующим формированием суммарной и разностной диаграмм направленности (ДН) или с использованием одного рупорного облучателя, в котором формирование указанных ДН происходит на основной и одной из высших мод соответственно. В первом случае суммарная и разностная ДН формируются как сумма и соответственно разность ДН облучателей [1-3]. Во втором случае формирование суммарной диаграммы направленности происходит с использованием основного типа волны  $H_{11}(HE_{11})$ , а формирование разностной диаграммы направленности с использованием высших типов волн  $E_{01}$ ,  $H_{01}$ ,  $H_{21}(HE_{21})$  [4-8].

Второй вариант построения излучающей системы является предпочтительным, т.к. при его использовании реализуется оптимальное возбуждение одной и той же апертуры зеркальной антенны как для суммарного, так и для разностного каналов, что позволяет добиваться высоких энергетических характеристик антенной системы. Однако, несмотря на кажущуюся простоту реализации данного варианта построения

моноимпульсной системы, его применение связано с рядом сложностей. В первую очередь, это определяется тем, что формирование парциальных ДН по углу места и азимуту происходит путем сложения сигнала суммарного канала с сигналом разностного канала с четырьмя различными комплексными коэффициентами  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ ,  $A_4$ , что соответствует плоскостям  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi = 270^\circ$ , показанным на рис.1.

Независимо от конкретной схемы устройства формирования парциальных ДН наличие частотной дисперсии, обусловленной необходимостью работы в широком диапазоне частот, температурной нестабильности и технологических погрешностей приводит к различию параметров каналов, участвующих в формировании парциальных диаграмм направленности, между собой. Следствием этого является неправильное формирование сигнала ошибки об угловой величине отклонения КА от равносигнального направления (РСН) и соответственно снижение точности измерений положения КА.

Анализ влияния указанных факторов на точность измерения угловых координат в известных работах [1-8] не проводился, что делает актуальным направление этих исследований для практики.

Целью статьи является анализ влияния рассогласования параметров в каналах моноимпульсной системы на величину ошибок измерения угловых координат в системе высокоточных траекторных измерений на основе зеркальной антенны Ка-диапазона с диаметром рефлектора 3,5 м.

Ошибка определения углового положения КА на орбите  $\Delta\varepsilon$ , зависящая от ошибок определения отклонения направления на КА от РСН, может быть представлена с помощью формулы

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{(\Delta\varepsilon_{UM})^2 + (\Delta\varepsilon_{AZ})^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varepsilon_{UM}$  и  $\Delta\varepsilon_{AZ}$  - соответственно ошибки определения направления на КА относительно РСН антенны по углу места  $\varepsilon_{UM}$  и азимута  $\varepsilon_{AZ}$  (рис. 1).

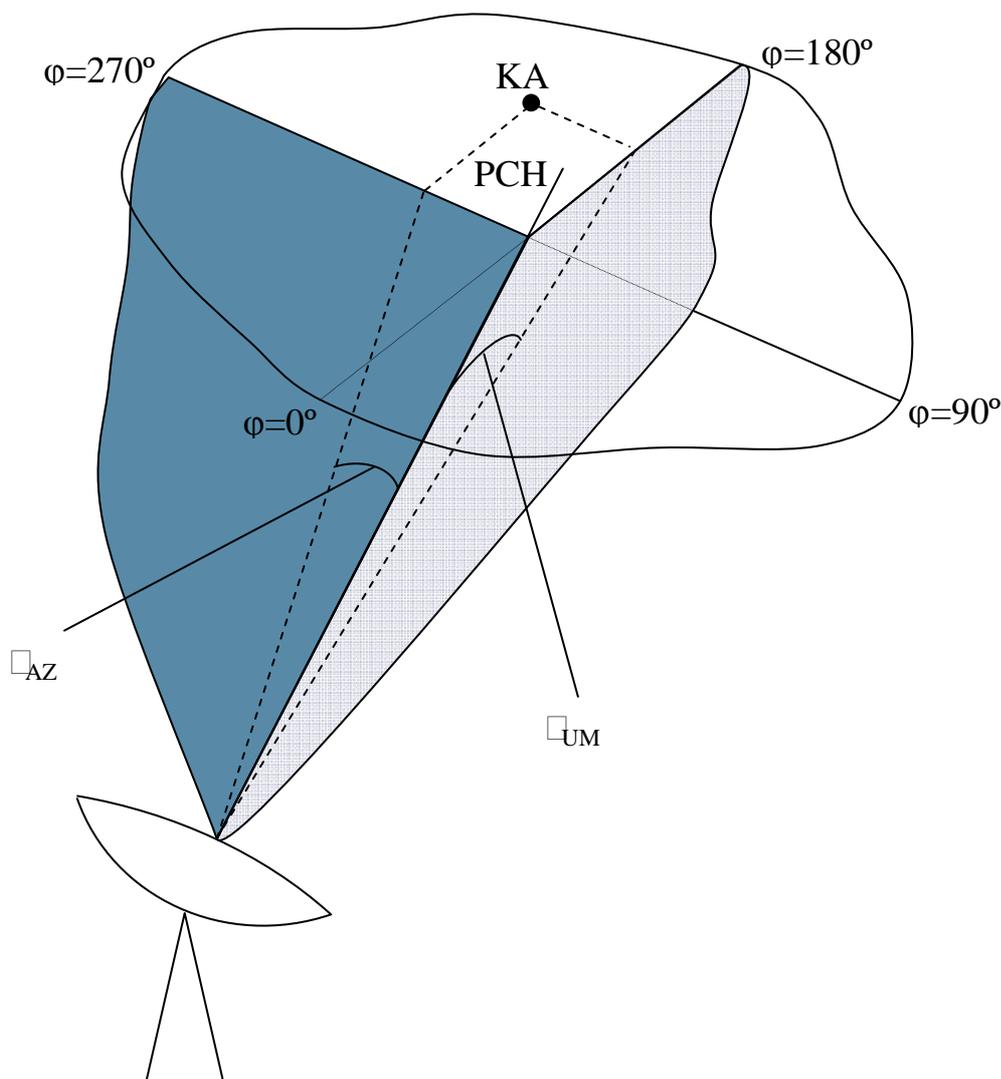


Рис.1. Ортогональные плоскости измерения угловых координат

Возникающие при отклонении КА от РСН антенны сигналы, пропорциональные  $\varepsilon_{UM}$  и  $\varepsilon_{AZ}$ , определяются как диаграммами направленности зеркальной антенны по суммарному и разностному каналам, так и задаваемыми в устройстве формирования сигнала ошибки (УФСО) комплексными коэффициентами  $A_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ). При этом коэффициенты  $A_1$ ,  $A_2$  используются при формировании парциальных ДН по углу места (плоскости  $\varphi=0^\circ$  и  $\varphi=180^\circ$ ), а коэффициенты  $A_3$ ,  $A_4$  - при формировании парциальных ДН по углу азимута ( $\varphi=90^\circ$  и  $\varphi=270^\circ$ ). Амплитуды коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  должны быть равны, а фазы различаться на  $\pi$  (0 и  $\pi$  соответственно). Аналогично

должны быть равны амплитуды коэффициентов  $A_3$  и  $A_4$ , а фазы также различаться на  $\pi$  ( $\pi/2$  и  $3\pi/2$  соответственно). Структурная схема УФСО показана на рис. 2.

Парциальные ДН, формируемые в угломестной плоскости, могут быть представлены с использованием соотношений

$$F_1(\theta, \varphi) = F_{\Sigma}(\theta, \varphi) + A_1 F_{\Delta}(\theta, \varphi)|_{\varphi=0}, \quad (2)$$

$$F_2(\theta, \varphi) = F_{\Sigma}(\theta, \varphi) + A_2 F_{\Delta}(\theta, \varphi)|_{\varphi=0}. \quad (3)$$

и аналогичным образом парциальные ДН, формируемые в азимутальной плоскости

$$F_3(\theta, \varphi) = F_{\Sigma}(\theta, \varphi) + A_3 F_{\Delta}(\theta, \varphi)|_{\varphi=\pi/2}, \quad (4)$$

$$F_4(\theta, \varphi) = F_{\Sigma}(\theta, \varphi) + A_4 F_{\Delta}(\theta, \varphi)|_{\varphi=\pi/2}. \quad (5)$$

Сигнал  $V_{UM}$ , определяющий отклонение КА от РСН по углу места, формируется следующим образом

$$V_{UM} = 20 \cdot \lg(F_1/F_2). \quad (6)$$

Аналогичное выражение справедливо для сигнала, определяющего отклонение КА от РСН в азимутальной плоскости

$$V_{AZ} = 20 \cdot \lg(F_3/F_4). \quad (7)$$

На основе измеренных значений  $V_{UM}$  и  $V_{AZ}$  угловое отклонение КА от РСН определяется следующим образом

$$\varepsilon_{UM} = \mu \cdot V_{UM}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{AZ} = \mu \cdot V_{AZ}, \quad (9)$$

где  $\mu$  - крутизна пеленгационной характеристики, полученной по результатам калибровок системы угловых измерений.

Калибровка осуществляется по находящемуся в дальней зоне и неподвижному в картинной плоскости источнику путем измерения уровней сигналов  $V_{UM}$  и  $V_{AZ}$  для известных отклонений ( $\varepsilon_{UM}$  и  $\varepsilon_{AZ}$  соответственно) источника от РСН антенны.

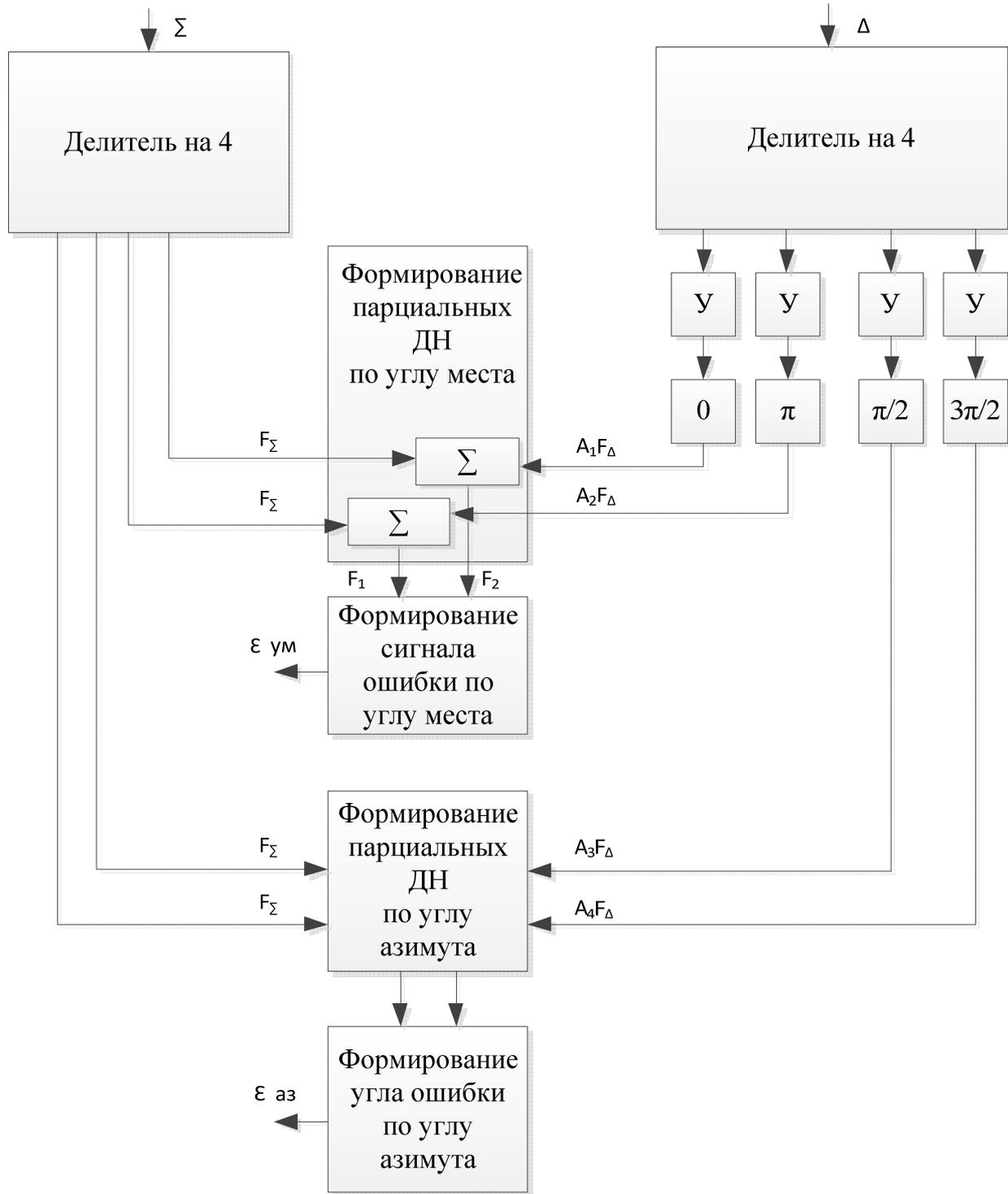


Рис.2. Структурная схема УФСО

Выбор коэффициентов суммирования  $A_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ) проводится с учетом требований к уровню пересечения парциальных ДН, что определяет крутизну пеленгационной характеристики (ПХ) и диапазон углов близкого к линейному участка пеленгационной характеристики. Однако отмеченные выше факторы

приводят к изменению комплексных коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$  от номинальных значений, что обуславливает появление ошибок при измерении угловых координат. В частности, при отклонении КА от РСН в угломестной плоскости ( $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$ ) и рассогласовании коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  возникает ошибка определения  $\varepsilon_{UM}$ . Кроме того, из соотношений (2)-(7) следует возникновение эффекта возникновения ложного сигнала об отклонении КА от РСН в азимутальной плоскости. Аналогичные эффекты имеют место и в случае отклонения КА в азимутальной плоскости. Таким образом, ошибка определения отклонения КА от РСН в каждой из плоскостей зависит от всех четырех коэффициентов  $A_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ), что может быть представлено в виде функционала

$$\Delta\varepsilon = \Phi(F_\Sigma(\theta, \varphi), F_\Delta(\theta, \varphi), A_1, A_2, A_3, A_4), \quad (10)$$

вид которого определяется соотношениями (2)-(9).

Для проведения исследований использовались результаты измерений суммарной и разностной ДН, формируемых зеркальной антенной с облучателем на высших модах, показанным на рис.3.

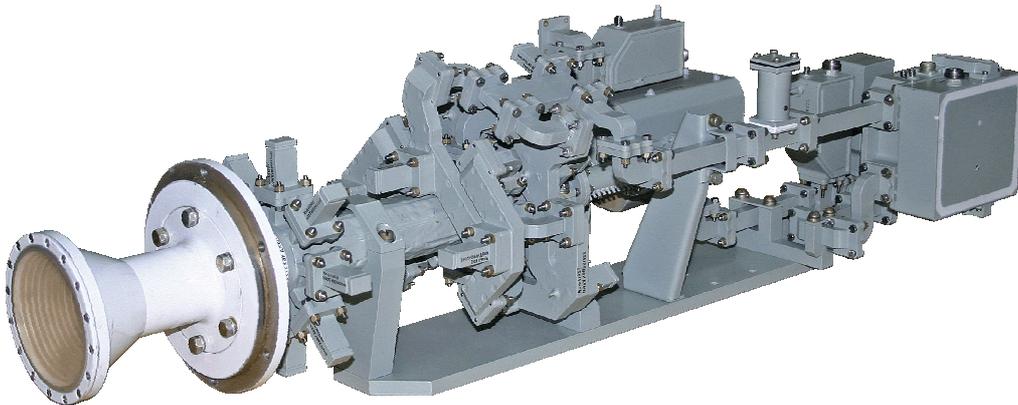


Рис. 3. Антенно-волноводный тракт для формирования суммарной и разностной ДН на основной и высшей модах

Данные диаграммы, полученные с использованием зеркальной антенны диаметром 3,5 м в Ка-диапазоне, приведены на рис. 4.

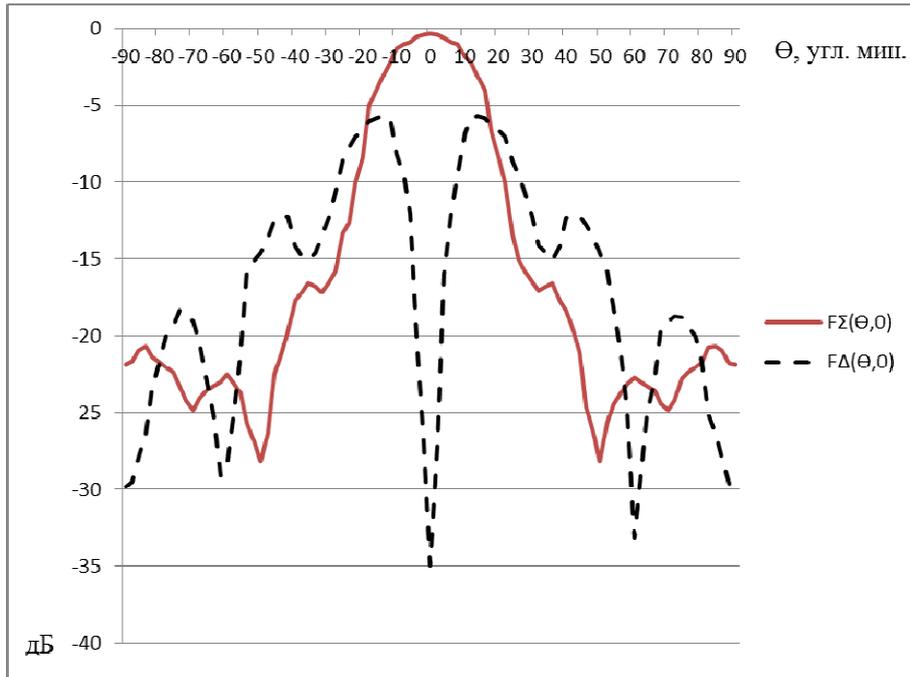


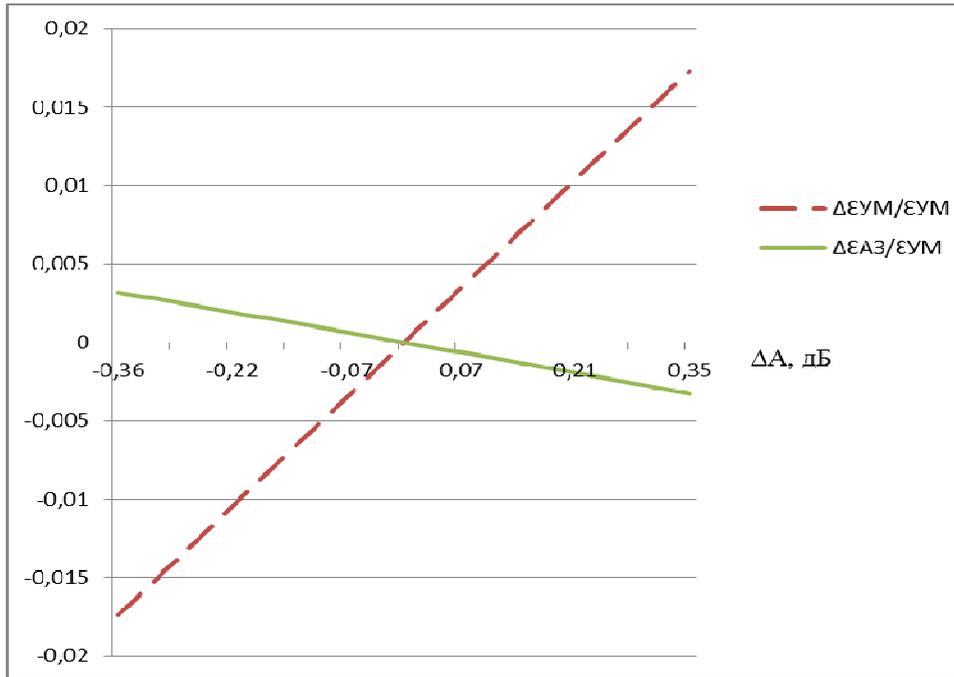
Рис.4. Суммарная и разностная ДН 3,5-метровой зеркальной антенны в Ка-диапазоне

На рис. 5 приведены зависимости нормированной величины ошибок  $\Delta\varepsilon_{UM}/\varepsilon_{UM}$  (штриховая линия) и  $\Delta\varepsilon_{AZ}/\varepsilon_{UM}$  (сплошная линия) от величины отклонения амплитуды коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  соответственно от номинальных значений.

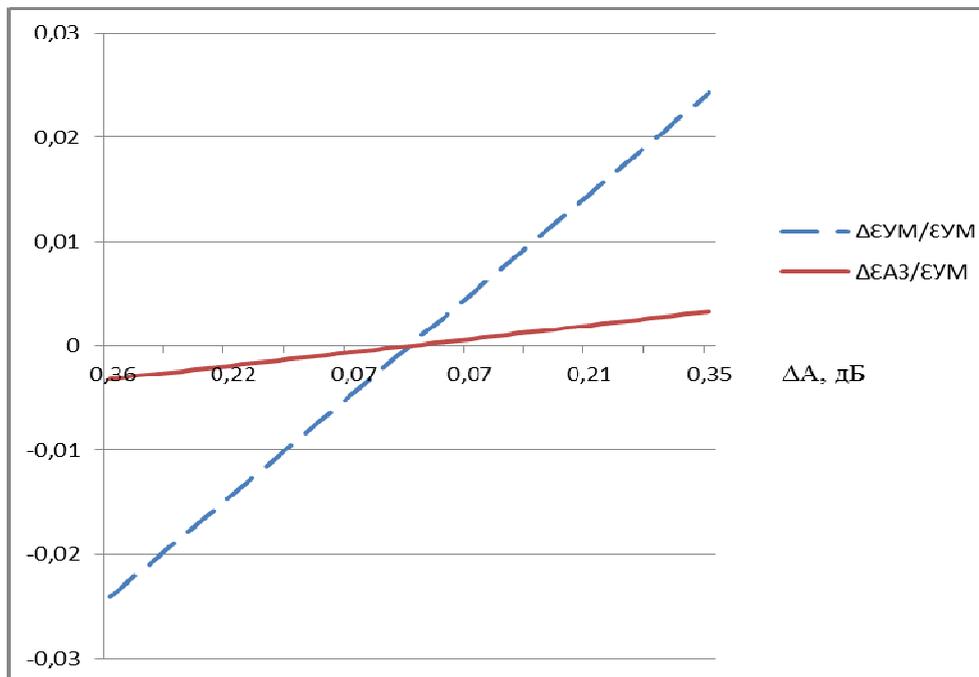
При проведении исследований рассматривался случай отклонения КА от РСН в угломестной плоскости на величину  $0,25\Delta\theta_{0,5}$  при  $\varphi=0^\circ$ , и  $\varphi=180^\circ$  (рис. 5,а и 5,б соответственно).

Как следует из полученных результатов, величина ошибки определения углового положения КА как в угломестной, так и азимутальной плоскости линейно зависит от отклонения амплитуды соответствующего коэффициента.

Однако в ортогональной по отношению к плоскости отклонения КА влияние отклонения модуля коэффициентов на порядок меньше по сравнению с основной плоскостью.



а)



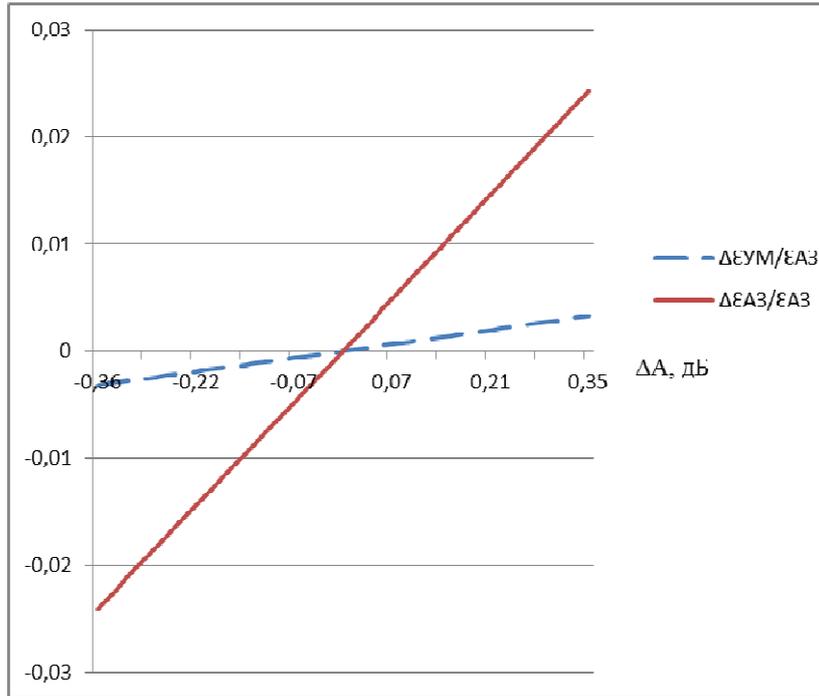
б)

Рис. 5. Нормированные величины ошибок  $\Delta \epsilon_{UM} / \epsilon_{UM}$  и  $\Delta \epsilon_{A3} / \epsilon_{UM}$  в зависимости от величины отклонения амплитуды коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\varphi = 0^\circ$ , б -  $\varphi = 180^\circ$ .

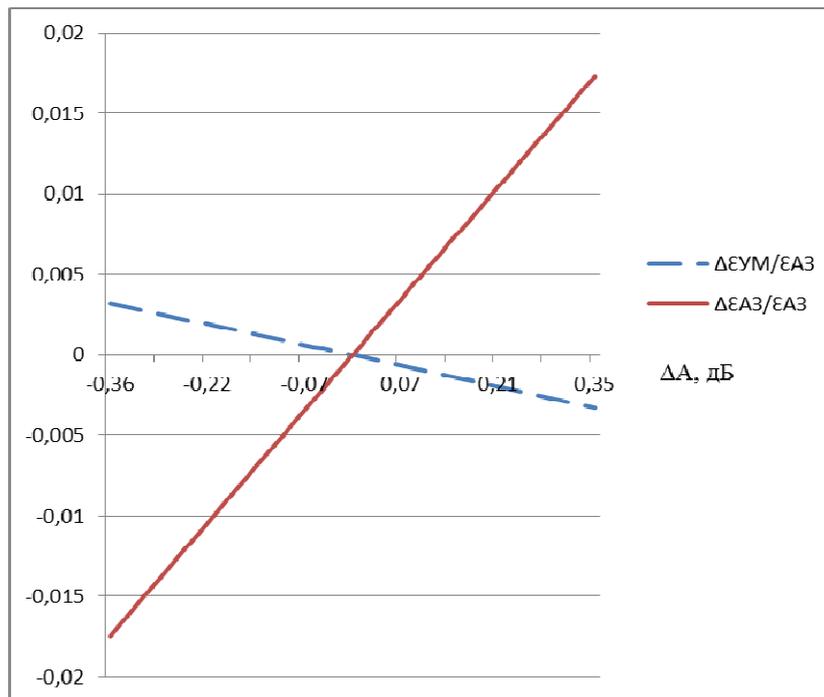
Кроме того, можно отметить, что, как следует из сравнения зависимостей ошибок, при отклонении КА от РСН в направлении искаженной парциальной ДН (парциальная ДН  $F_1(\theta, \varphi)$ ) ошибка определения углового положения КА меньше по сравнению со случаем отклонения КА в противоположном направлении (парциальная ДН  $F_2(\theta, \varphi)$ ). Для ортогональной плоскости явной зависимости нет, и наблюдается изменение только знака ошибки. Полученные результаты могут быть легко интерпретированы при анализе возникающих ошибок измерения угловых координат при отклонении КА от РСН в азимутальной плоскости ( $\varphi = 90^\circ$  и  $\varphi = 270^\circ$ , рис. 6,а и 6,б соответственно) и влияния отклонения амплитуд коэффициентов  $A_2$  и  $A_4$  от номинальных значений.

На рис. 7-10 приведены результаты аналогичных исследований по влиянию отклонений фаз  $\delta\varphi_1$  и  $\delta\varphi_3$  коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  на ошибки определения угловых координат КА при различных отклонениях КА от РСН ( $\varphi = 0^\circ, \varphi = 180^\circ, \varphi = 90^\circ, \varphi = 270^\circ$  для рис. 7, 8, 9 и 10 соответственно).

На основе данных зависимостей можно отметить ряд отличий, возникающих в данном случае по сравнению с ранее рассмотренными результатами. Во-первых, зависимость величины нормированной ошибки в угломестной плоскости ( $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$ ) от отклонения фазы коэффициента  $A_1$  носит ярко выраженный квадратичный характер. При этом знак ошибки не зависит от знака отклонения фазы. В ортогональной плоскости сохраняется линейная зависимость величины ошибки от отклонения фазы коэффициента. Однако теперь величина ошибки в ортогональной плоскости на порядок больше величины ошибки в плоскости отклонения. Кроме того, знак ошибки определения углового положения КА относительно РСН в ортогональной плоскости не зависит от направления отклонения КА в исходной плоскости ( $\varphi = 0^\circ$  или  $\varphi = 180^\circ$ ).

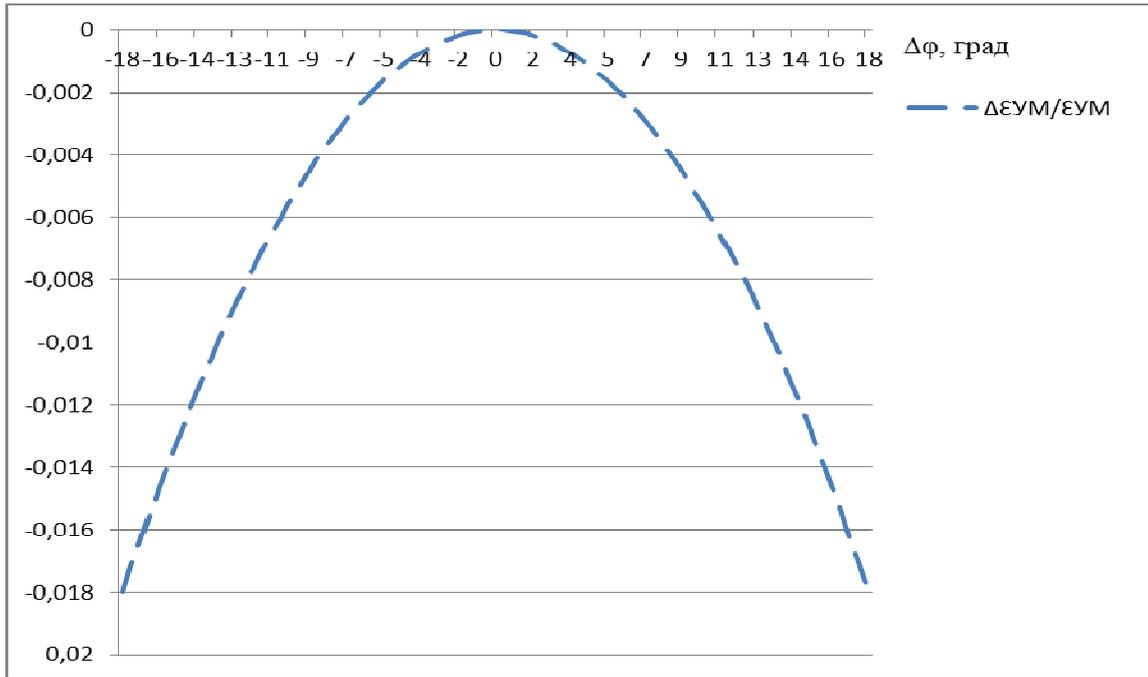


а)

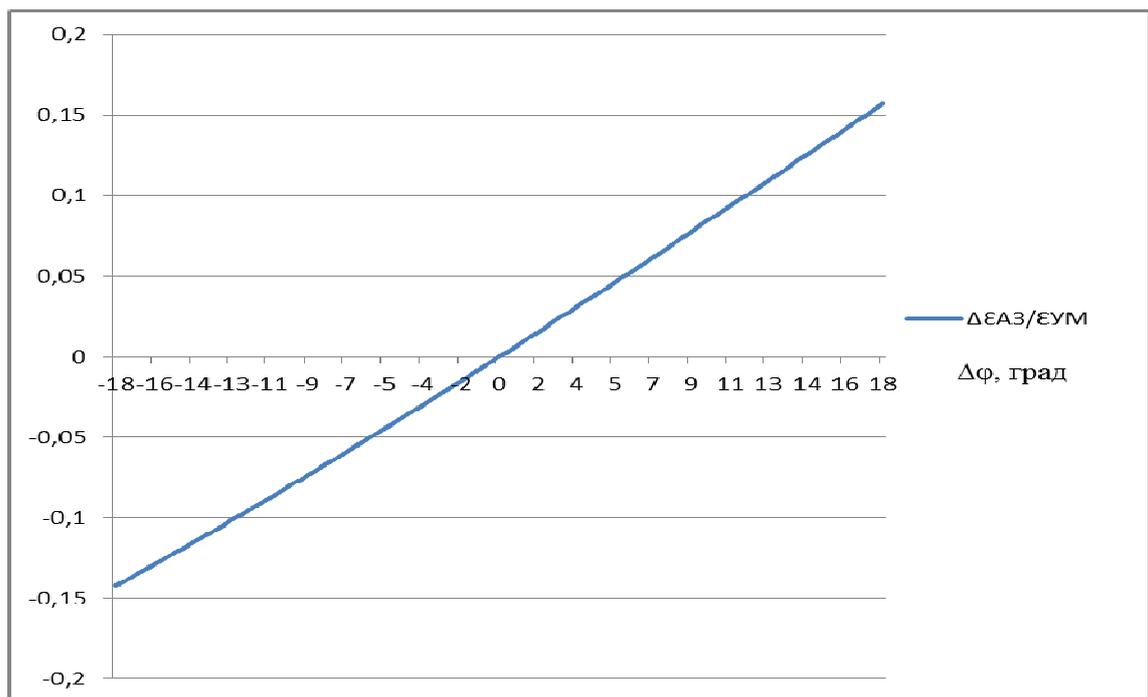


б)

Рис. 6. Нормированные величины ошибок  $\Delta \epsilon_{УМ} / \epsilon_{УМ}$  и  $\Delta \epsilon_{АЗ} / \epsilon_{УМ}$  в зависимости от величины отклонения амплитуды коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\varphi = 90^\circ$ , б -  $\varphi = 270^\circ$ .

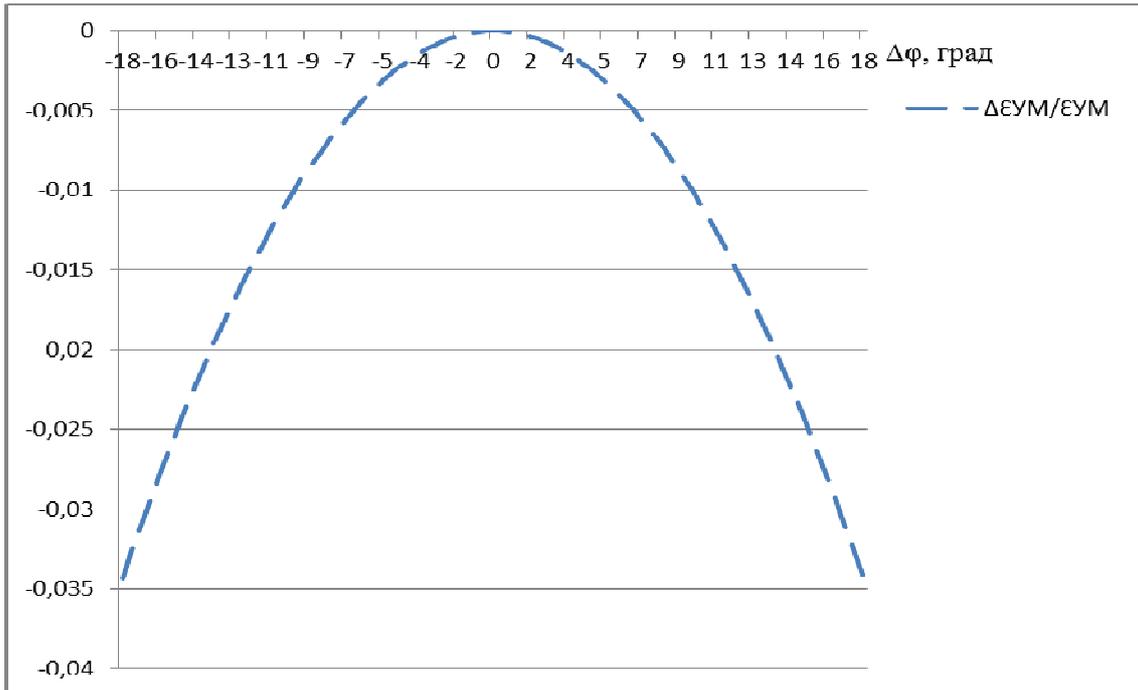


а)

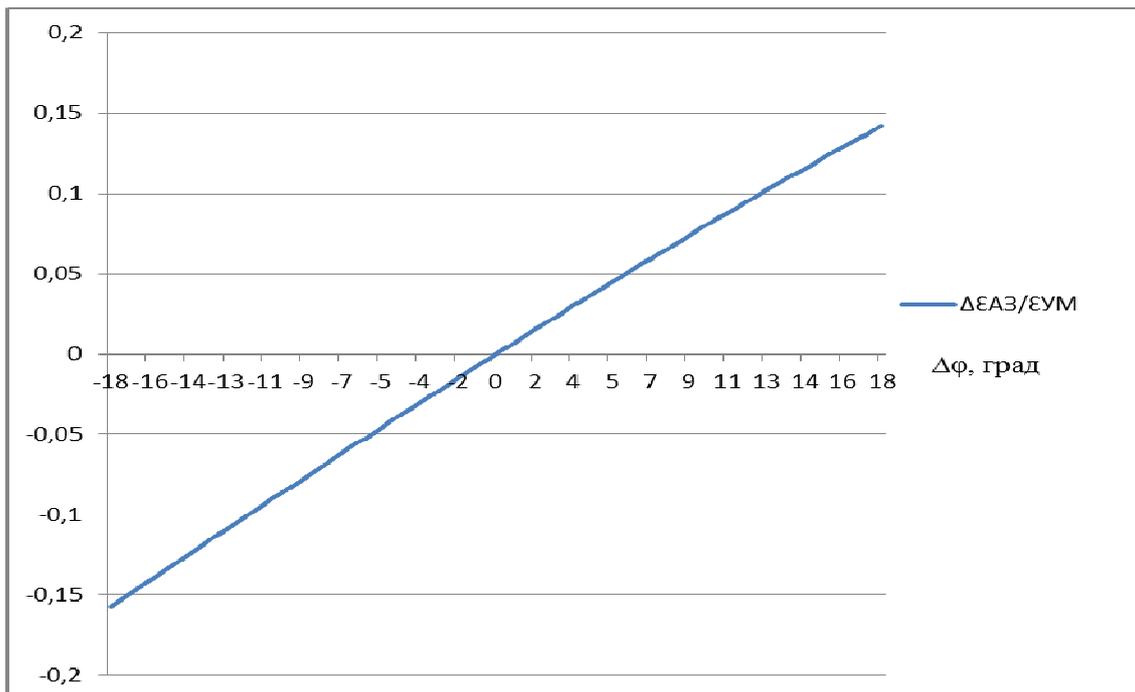


б)

Рис. 7. Нормированные величины ошибок в плоскости  $\varphi = 0^\circ$  в зависимости от величины отклонения фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\Delta\epsilon_{UM}/\epsilon_{UM}$ , б -  $\Delta\epsilon_{A3}/\epsilon_{UM}$ .

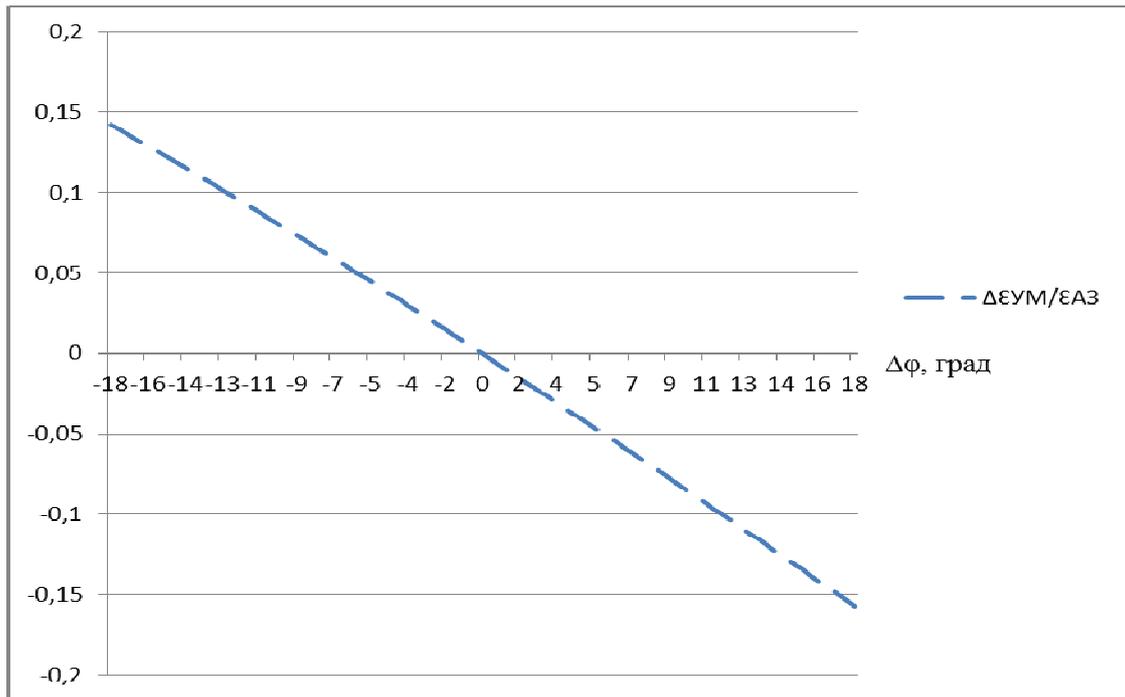


а)

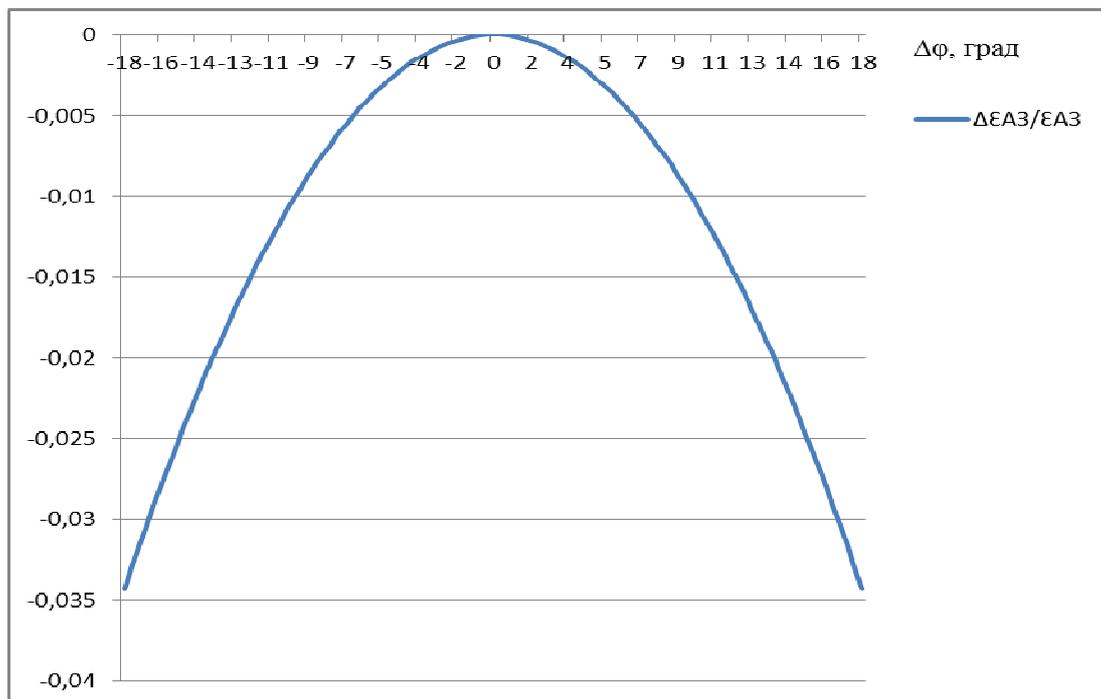


б)

Рис. 8. Нормированные величины ошибок в плоскости  $\varphi = 180^\circ$  в зависимости от величины отклонения фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\Delta \epsilon_{УМ} / \epsilon_{УМ}$ , б -  $\Delta \epsilon_{А3} / \epsilon_{УМ}$ .

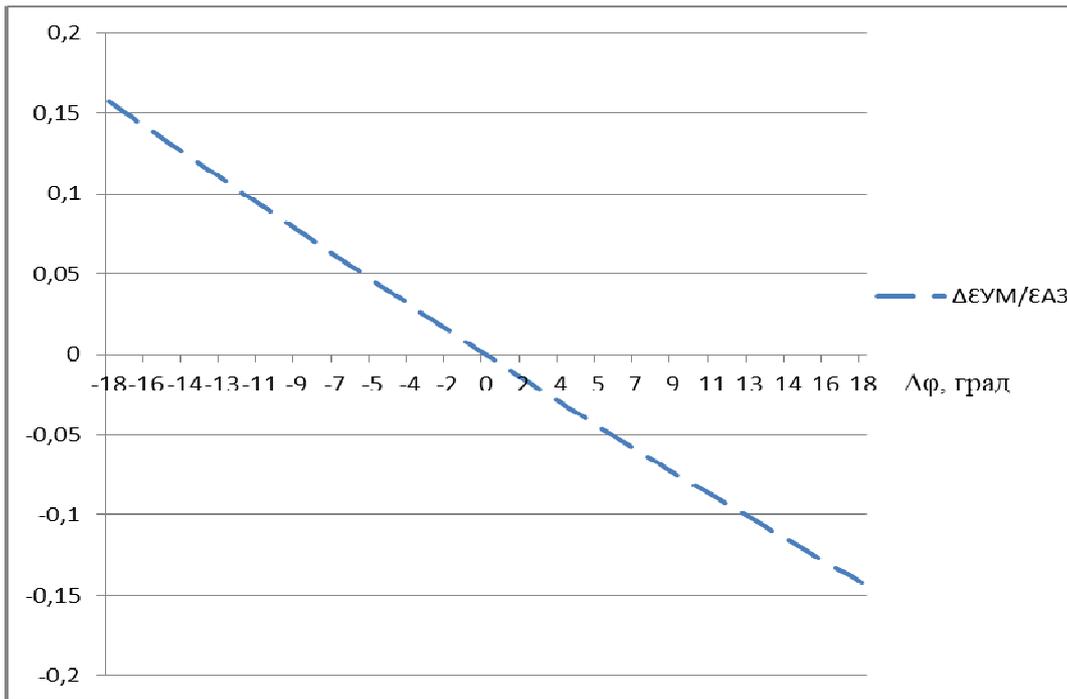


а)

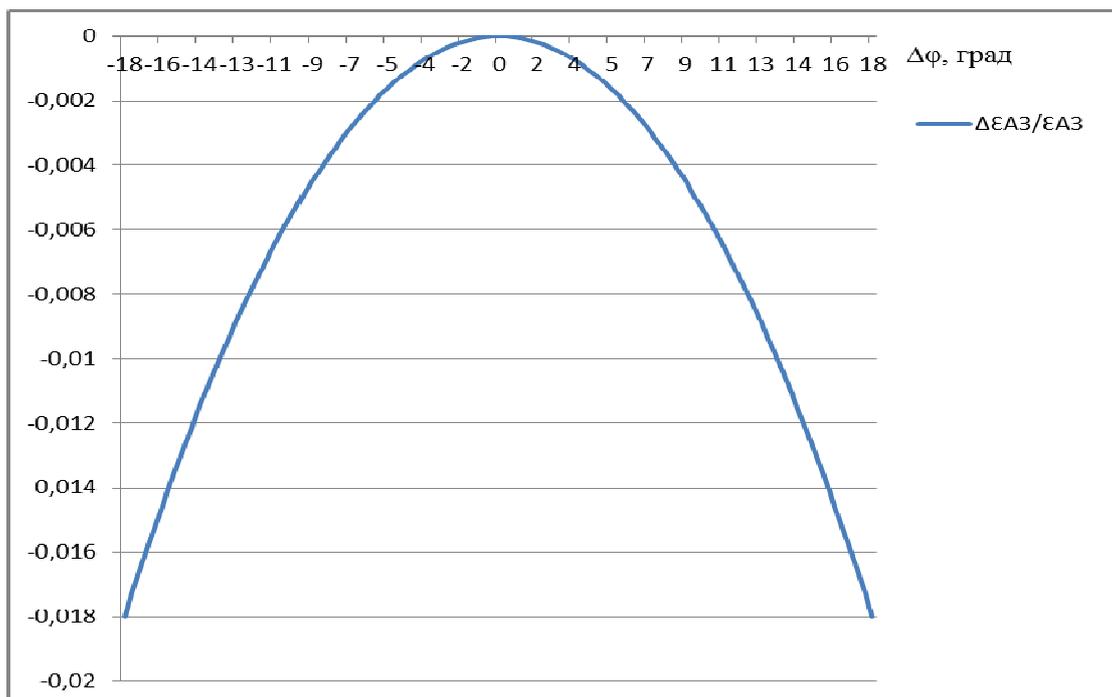


б)

Рисунок 9. Нормированные величины ошибок в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  в зависимости от величины отклонения фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\Delta\epsilon_{УМ}/\epsilon_{УМ}$ , б -  $\Delta\epsilon_{АЗ}/\epsilon_{УМ}$ .



а)



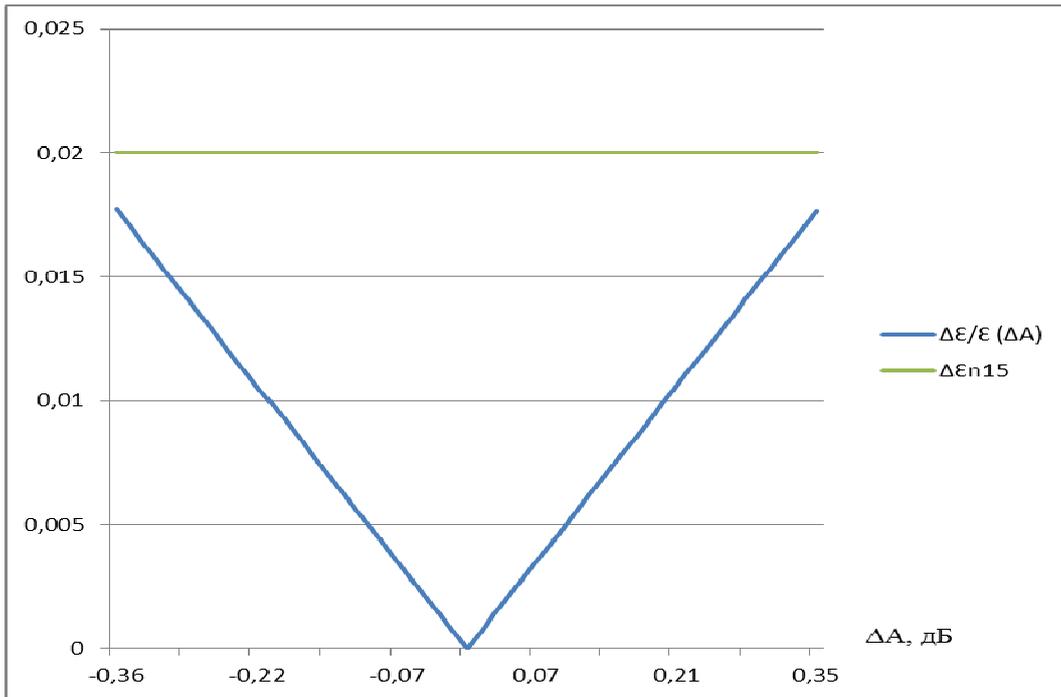
б)

Рисунок 10. Нормированные величины ошибок в плоскости  $\varphi = 270^\circ$  в зависимости от величины отклонения фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а -  $\Delta\epsilon_{УМ}/\epsilon_{УМ}$ , б -  $\Delta\epsilon_{АЗ}/\epsilon_{УМ}$ .

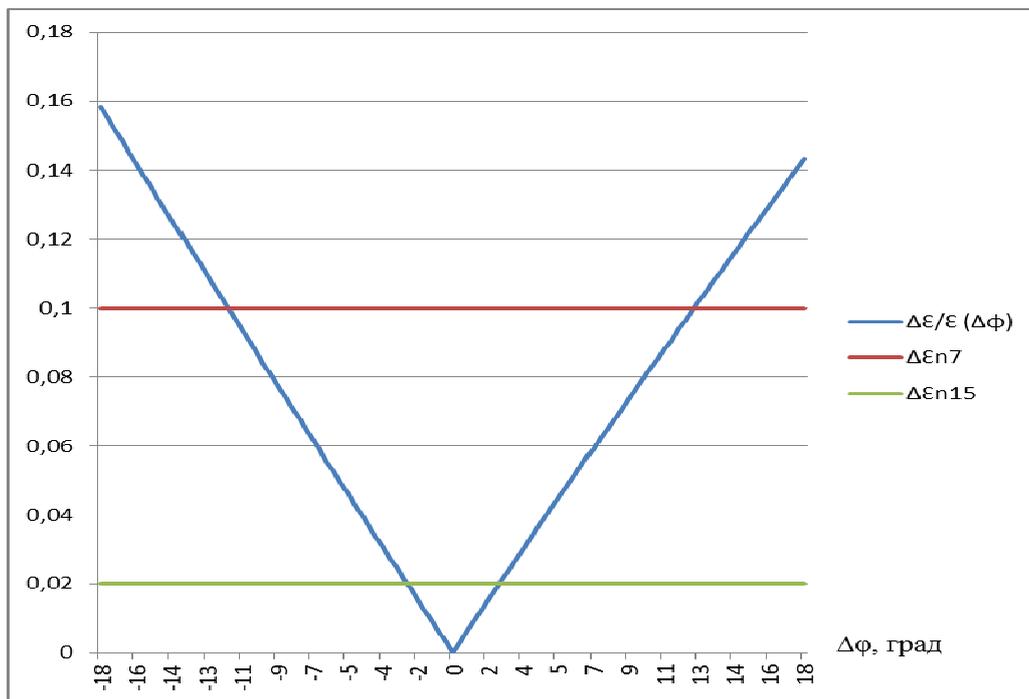
Полученные результаты позволяют оценить полную ошибку определения угловых координат с использованием моноимпульсных систем на базе зеркальной антенны с облучателем на высших модах. На рис. 11 показаны зависимости величины полной ошибки определения углового положения КА, определяемой соотношением (1), нормированной к углу отклонения КА от РСН. Результаты получены для рассмотренного выше случая отклонения КА в угломестной плоскости. На рисунке с индексом  $a$  приведена зависимость полной ошибки от ошибки амплитуды, а на рисунке с индексом  $b$  - от ошибки фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$ . На тех же графиках приведены величины среднеквадратических ошибок, обусловленных шумовыми составляющими сигнала КА ( $\delta\epsilon_{n7}$  - при соотношении сигнал/шум 7 дБ,  $\delta\epsilon_{n15}$  - при соотношении сигнал/шум 15 дБ).

На рис. 12 приведены линии уровней полной ошибки определения угловых координат КА от величины отклонений амплитуды и фазы коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений.

Приведенные результаты показывают, что, во-первых, отклонения фазы коэффициентов суммирования от номинальных значений оказывают большее влияние на точность измерения угловых координат и, во-вторых, позволяют определить по величине погрешности определения угловых координат максимально допустимые отклонения амплитуды и фазы коэффициентов суммирования  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ ,  $A_4$  от номинальных значений. В частности, отклонения амплитуд коэффициентов в каналах формирования парциальных ДН на 0,5 дБ приводит к появлению дополнительной ошибки, равной флуктуационной ошибке измерения угловых координат при отношении сигнал/шум 15 дБ. В случае наличия фазовых ошибок допустимая величина отклонения фаз данных коэффициентов составляет величину 5 град. При отношении сигнал шум 7 дБ допустимая величина фазовой ошибки увеличивается до 13 град.



а)



б)

Рис. 11. Нормированные величины полной ошибки в зависимости от величины отклонения коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  от номинальных значений: а - амплитуды, б - фазы.

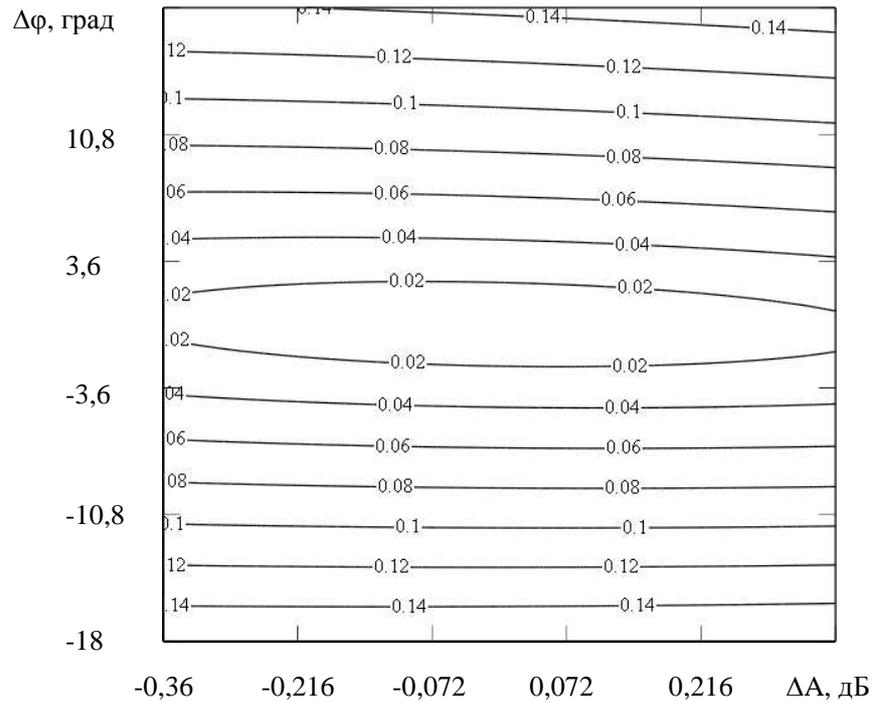


Рис. 12. Линии уровней величины полной ошибки

Полученные результаты остаются справедливыми и при анализе характеристик моноимпульсной системы в Ku-диапазоне частот.

Таким образом, выполненные для угломерной моноимпульсной системы, построенной на основе зеркальной антенны с облучателем на высших модах, исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основе антенн с диаметром рефлектора 3,5 м возможно построение моноимпульсных систем в Ku- и Ka-диапазонах, обеспечивающих точность измерения угловых координат КА порядка угловых секунд.

2. Полученные зависимости связывают достижимую погрешность определения угловых координат КА с величиной рассогласования коэффициентов передачи суммарного и разностного каналов и, как следствие, с величиной отклонения параметров УФСО от номинальных значений и дают возможность определить требования к величине допустимого отклонения параметров в каналах моноимпульсной системы в зависимости от требуемых точностей пеленгации КА. Так при отношении сигнал/шум 15 дБ допустимая

величина отклонения амплитуды в каналах формирования парциальных ДН составляет 0,5 дБ и фазы – 5 град. При отношении сигнал/шум 7 дБ допустимое отклонение фазы коэффициентов суммирования возрастает до 13 град.

3. Исследования, проведенные на основе экспериментальных ДН антенны Ка-диапазона с диаметром зеркала 3,5 м и математической модели моноимпульсной системы, показали, что:

- величина ошибки определения углового положения КА в обеих плоскостях линейно зависит от отклонения амплитуды соответствующего коэффициента. Однако в ортогональной по отношению к плоскости отклонения КА влияние отклонения модуля коэффициентов на порядок меньше по сравнению с основной плоскостью. Кроме того, при отклонении КА от РСН в направлении искаженной парциальной ДН ошибка определения углового положения КА меньше по сравнению со случаем отклонения КА в противоположном направлении. Для ортогональной плоскости наблюдается изменение только знака ошибки;

- влияние отклонений фаз в каналах моноимпульсной системы от номинальных значений на ошибки определения угловых координат КА имеет ряд отличий по сравнению с влиянием отклонений амплитуд. Так зависимость величины нормированной ошибки от отклонения фазы коэффициента носит в соответствующей плоскости ярко выраженный квадратичный характер. При этом знак ошибки не зависит от знака отклонения фазы. В то же время в ортогональной плоскости сохраняется линейная зависимость величины ошибки от отклонения фазы коэффициента. Однако величина ошибки в ортогональной плоскости на порядок больше величины ошибки в плоскости отклонения. Кроме того, знак ошибки определения углового положения КА относительно РСН в ортогональной плоскости не зависит от направления отклонения КА в исходной плоскости.

## Литература

1. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. М.: Сов. радио, 1970.
2. Теоретические основы радиолокации: Учеб. пособие для вузов / А. А. Коростелев, Н. Ф. Ключев, Ю. А. Мельник и др. / Под ред. В. Е. Дулевича. 2-е изд., перераб и доп. М.: Сов. радио. 1978. 608с.
3. Справочник радиолокации / Под. ред. М. Скольника. Т.4. М.: Сов. радио. 1978.
4. M.J. Shiau, Y.H. Choung, C.H. Chen, and M.H. Chen/ NASA ACTS autotrack antenna feed system // Antennas and Propagation Society International Symposium. 1986. V. 24. P.83-86.
5. Lenzing, E.H., Lenzing H.F. Characteristics of the  $TE_{21}$  mode in circular apertures as used for satellite tracking // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. 2001. V. 37. P1113-1117.
6. Sharad Patel, Roland Schwerdtfeger, Raj Chugh and John Webb. A Tri-band Antenna with Dual Band  $TE_{21}$  Mode Tracking. Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999. V. 1. P.700-703.
7. Lotfy Sakr. The Higher Order Modes In The Feeds Of The Satellite Monopulse Tracking Antennas. // IEEE Melecon 2002. May 7 – 9. Cairo. Egypt.
8. J. Nateghi, L. Mohammady and E. Jedari/ Analysis of the  $TE_{21}$  Mode Monopulse Tracking Technique in LEO Satellite Systems // The Fourth Advanced International Conference on Telecommunications 2008. P.42-45.
9. Демченко В.И., Косогор А.А., Раздоркин Д.Я., Саранов А.А., Гвоздяков Ю.А. Система высокоточных траекторных измерений в Ku-диапазоне // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 15-17 июня 2011. – М.: Радиотехника. С.264-274.
10. Воробьев Н.Ю., Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Косогор А.А., Раздоркин Д.Я., Саранов А.А. Влияние рассогласования параметров моноимпульсной системы на основе зеркальной антенны с облучателем на высших модах на

точность измерения угловых координат // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 19-22 ноября 2012 г. Т.1. С. 250-254.

11. Коровкин А. Е., Раздоркин Д. Я., Шипулин А. В. Моноимпульсный облучатель зеркальных антенн на высших типах волн // Антенны. 2012. №9(184). С. 14-18.