

УДК 621.396.677

Синтез устойчивого разностно-равносигнального метода автосопровождения космического аппарата цифровой антенной решеткой

С. И. Ватутин

к. т. н., с. н. с.,

АО «Российские космические системы»

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru

Аннотация. Путем анализа возможных разновидностей равносигнальных и разностных методов автосопровождения космических аппаратов в предложенной ранее широкополосной цифровой антенной решетке синтезирован устойчивый в широком диапазоне параметров разностно-равносигнальный метод автосопровождения. Предлагаемый метод предусматривает при сопровождении по углу места электронное отклонение суммарного луча ближней и дальней половин антенного поля, определение разностного сигнала в каждой половине, а затем разности полученных разностных сигналов, которая и является управляющим сигналом сопровождения КА по углу места. Аналогично управляющим сигналом автосопровождения КА по азимуту является разность разностных сигналов от суммарных лучей в левой и правой половинах антенного поля. Приведены графики автосопровождения во всех рассмотренных методах. Результаты работы могут быть использованы при проектировании цифровых антенных полей.

Ключевые слова: антенная решетка, приемник, фазирование, промежуточная частота, разность хода лучей, автосопровождение, сумма, разность, равносигнальный

Development of a Stable Differential-Equisignal Method for Spacecraft Autotracking with a Digital Antenna Array

S. I. Vatutin

candidate of engineering science, senior researcher,

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru

Abstract. By analyzing the possible implementations of equisignal and differential methods for spacecraft autotracking in a previously suggested broadband digital antenna array, a differential-equisignal autotracking method stable in a wide parameter range was developed. When autotracking by elevation, this method suggests an electronic displacement of the sum beam of the near and far half of the antenna field, determination of a difference signal for each half, calculation of the difference of the received differential signals, which is the control signal for autotracking by elevation. By analogy, the control signal for autotracking by azimuth is the difference between the differential signals from the sum in the left and right halves of the antenna array. Diagrams for all the discussed methods are presented. The results of this article can be used to design digital antenna arrays.

Keywords: antenna array, receiver, phasing, intermediate frequency, path difference, autotracking, sum, difference, equisignal

В последнее десятилетие в антенной технике все большее внимание уделяется цифровым антенным решеткам (ЦАР), в которых вся тяжесть фазирования антенн перекладывается с фазовращателей и линий задержки на цифровую обработку [1]. Цифровые антенные решетки, часто называемые в зарубежной литературе «умными антеннами» (Smart Antenna), находят все большее применение в радиолокации [2–4], в связи, в том числе и в сотовой [5, 6], и в навигации [7, 8]. Вместе с тем во всех известных из литературы случаях элементарные антенны ЦАР располагаются достаточно близко друг к другу так, что для времени распространения по решетке Δt и полосы полезного сигнала Δf соблюдается условие узкополосности системы, то есть $\Delta t \cdot \Delta f \ll 1$. Однако в системах управления космическими аппаратами (КА) при построении антенного поля по условию отсутствия затенения друг друга антенны должны быть разнесены на десятки метров. Например, антенны диаметром 5 м должны быть разнесены на 40 м, чтобы не мешать друг другу по 7-градусной зоне радиовидимости. Поэтому даже для точного фазирования центральных гармоник промежуточной частоты традиционными способами при передаче телеметрической информации (ТМИ) со скоростью 0,5 Мбит/с гармоники по краям спектра, отстоящие примерно на $\Delta f = 1$ МГц, дадут набег фаз $\Delta \varphi = 2\pi \cdot \Delta f \cdot \Delta t = 2\pi \cdot \Delta f \cdot (\Delta L/c) = 2\pi \cdot 10^6 \times \times 40/(3 \cdot 10^8) = 0,27\pi$. Поскольку при детектировании гармоники симметричных частот спектра радиосигнала складываются, то подобные набег фаз приведут к сильным искажениям передаваемых широкополосных сигналов.

Реализация простой идеи задержки принимаемых сигналов до полного совпадения наталкивается на непреодолимые технические трудности. По мнению автора, решение надо искать на путях применения дискретизации с последующей цифровой обработкой дискретных отсчетов сигналов разных антенн. При этом если нельзя сдвинуть до совпадения принимаемые сигналы, то почему бы не сдвинуть сетки импульсов дискретизации сигналов разных антенн так, чтобы взятие отсчетов происходило для разных сигналов в одном и том же фронте?

Идея метода изложена автором в работе [9], где показано устройство фазирования антенн,

схема которого представлена на рис. 1 и 2. Подробно предложенное устройство фазирования антенн описано в патенте [10].

Здесь в соответствии с азимутом и углом места цели рассчитывается сдвиг сигналов разных антенн по времени в интервалах дискретизации. Сдвиг на целую часть интервала дискретизации осуществляется за счет выборки измерений при сложении из своих массивов с соответствующими индексами, а сдвиг на дробную часть интервала дискретизации осуществляется в блоке задержки импульсов дискретизации на рис. 2.

На рис. 1 показано, что в начале зоны радиовидимости (ЗРВ) КА должны складываться дискретные отсчеты 1, в середине ЗРВ складываются отсчеты 2, а в конце ЗРВ — отсчеты 3 из массивов с индексами, соответствующими текущему набегу фаз между антеннами.

Для решения задачи автосопровождения цели (космического аппарата) необходимо сформировать два управляющих сигнала, пропорциональных отклонению суммарного луча антенного поля от цели в двух желательных ортогональных направлениях.

Принципиально возможны следующие варианты:

1. Изменяя фазовые соотношения антенн антенного поля относительно опорной антенны, качнуть суммарный луч на некоторый угол в сторону увеличения угла места луча, зафиксировать величину принимаемого сигнала, потом качнуть на тот же угол в сторону уменьшения угла места луча. Снова зафиксировать величину принимаемого сигнала, вычесть одно значение из другого, получив сигнал управления наведением антенн по углу места. Аналогично получаем управляющий сигнал наведения по азимуту.

2. Изменяя фазовые соотношения антенн антенного поля относительно опорной антенны, качнуть суммарный луч на некоторый угол в сторону увеличения угла места луча и одновременно на некоторый угол в сторону увеличения азимута. Зафиксировать величину принимаемого сигнала, потом качнуть на те же углы в сторону уменьшения угла места и азимута луча, снова зафиксировать величину принимаемого сигнала, вычесть одно значение из другого, получив сигнал управления наведением антенн синфазно по углу места и азимуту.

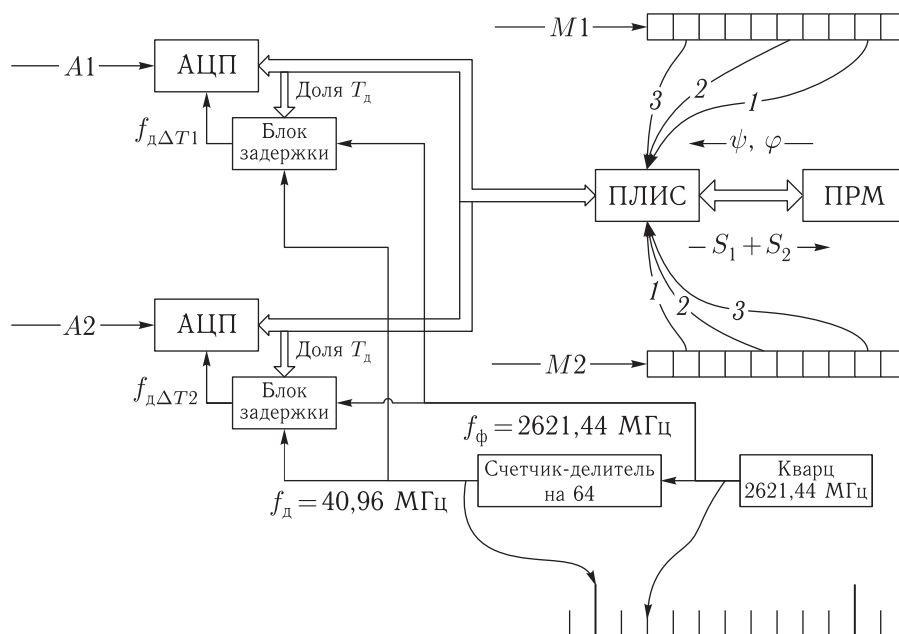


Рис. 1. Устройство фазирования

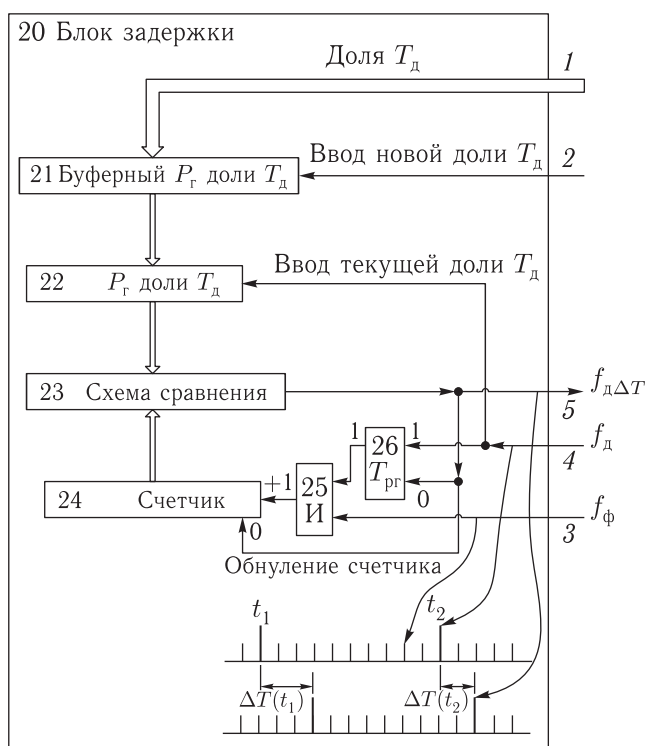


Рис. 2. Блок задержки импульса

Аналогично получаем управляющий сигнал противофазного наведения антенн по углу места и по азимуту, когда один угол возрастает, а другой убывает.

3. То же самое, что в методе 1, но изменяя фазовые соотношения антенн антенного поля относительно фазового центра антенного поля.

4. То же самое, что в методе 2, но изменяя фазовые соотношения антенн антенного поля относительно фазового центра антенного поля.

5. Фазы сигналов антенн поля отсчитываются относительно опорной антенны. Далее, из суммарного сигнала ближней к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал дальней от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по углу места. Аналогично из суммарного сигнала левой по отношению к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал правой по отношению к КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по азимуту.

6. Фазы сигналов всех антенн отсчитываются от фазового центра поля ЦАР. Далее, как в методе 5, из суммарного сигнала ближней к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал дальней от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по углу места. Аналогично из суммарного сигнала левой по отношению к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал правой по отношению к КА половины антенного поля

и получить тем самым управляющий сигнал по азимуту.

7. На каждой антенне к разности фаз с опорной антенной добавляется сдвиг по фазе на $+\Delta\xi$ и вычитается сдвиг по фазе $-\Delta\xi$. В случае $+\Delta\xi$ это эквивалентно электронному (то есть без изменения амплитуды сигнала) наклону диаграммы направленности антенны на некоторый угол в сторону КА, а в случае $-\Delta\xi$ это эквивалентно электронному наклону антенны на некоторый угол в сторону от КА. При этом в одном из этих случаев рассогласование диаграммы направленности по углу места усугубляется, а в другом — компенсируется. Аналогично при разбиении антенного поля на правую и левую половины сдвиги по фазе эквивалентны качанию диаграммы вправо-влево, что в одном из этих случаев ведет к усугублению рассогласования по азимуту, а в другом — к компенсации рассогласования по азимуту. Управляющими сигналами по углу места и азимуту являются формируемые далее разностные сигналы.

Далее, на каждой антенне из сигнала с положительным фазовым сдвигом на $+\Delta\xi$ вычитается сигнал с отрицательным фазовым сдвигом на $-\Delta\xi$.

Полученные разностные сигналы антенн складываются отдельно для ближней-дальней и правой-левой половин антенного поля.

Для получения управляющего сигнала по наведению антенны по направлению «ближе-дальше» из суммы разностных сигналов ближней к КА половины антенного поля вычесть сумму разностных сигналов дальней от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по углу места.

Для получения управляющего сигнала по наведению антенны по направлению «справа-слева» из суммы разностных сигналов правой по отношению к КА половины антенного поля вычесть сумму разностных сигналов левой от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по азимуту.

Общие положения

Схема антенной решетки при отсчете направлений относительно фазового центра опорной антенны A_0 представлена на рис. 3, а при отсчете

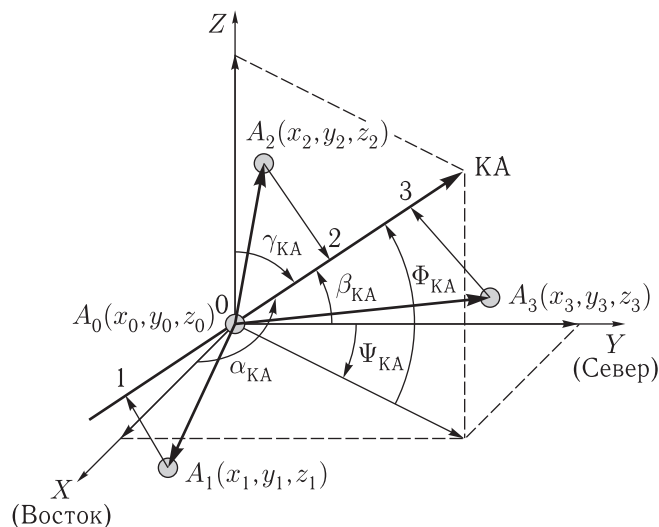


Рис. 3. Схема антенной решетки при отсчете направлений относительно фазового центра опорной антенны A_0

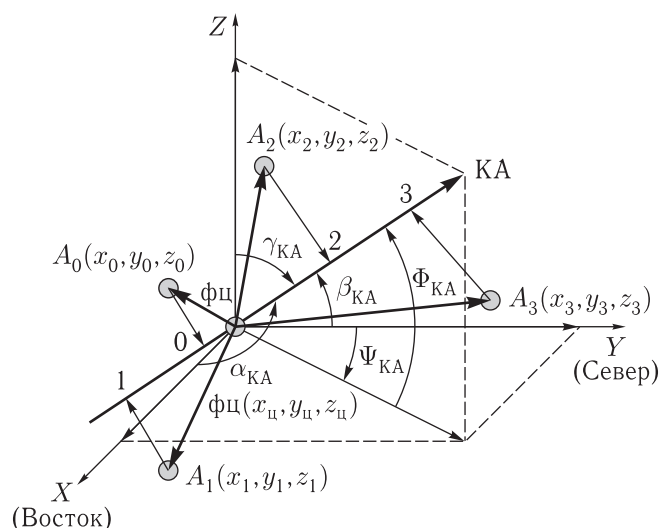


Рис. 4. Схема антенной решетки при отсчете направлений относительно фазового центра (ФЦ) антенной решетки

направлений относительно фазового центра (ФЦ) антенной решетки — на рис. 4.

На рис. 3 $\Phi_{КА}$ — угол места КА, $\Psi_{КА}$ — угол азимута КА. Элементарная антенна A_i , $i = 0, \dots, N-1$, неэквидистантной цифровой антенной решетки (ЦАР) из N антенн имеет координаты (x_i, y_i, z_i) .

Разность хода лучей от КА до A_i и A_0

$$\begin{aligned}\Delta R_{i0} &= L_{i0} \cdot \cos(\angle A_i - 0 - \text{КА}) = \\ &= L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{i0}) \cdot \cos(\alpha_{\text{КА}}) + \\ &\quad + \cos(\beta_{i0}) \cdot \cos(\beta_{\text{КА}}) + \\ &\quad + \cos(\gamma_{i0}) \cdot \cos(\gamma_{\text{КА}})].\end{aligned}\quad (1)$$

Расстояние от антенны A_0 до антенны A_i

$$L_{i0} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{\text{КА}}) &= \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}); \\ \cos(\beta_{\text{КА}}) &= \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}}); \\ \cos(\gamma_{\text{КА}}) &= \sin(\Phi_{\text{КА}}); \end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{i0}) &= (x_i - x_0)/L_{i0}; \\ \cos(\beta_{i0}) &= (y_i - y_0)/L_{i0}; \\ \cos(\gamma_{i0}) &= (z_i - z_0)/L_{i0}.\end{aligned}\quad (4)$$

Набег времени

$$\Delta T_{i0} = \Delta R_{i0}/c, \quad (5)$$

где c — скорость света в свободном пространстве.

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_0 на промежуточной частоте f_n

$$\Delta \varphi_{i0} = \omega_n \cdot \Delta T_{i0} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i0}. \quad (6)$$

При одновременном отклонении от направления на объект по углу места на $\Delta \Psi$ и по азимуту на угол $\Delta \Phi$ имеем:

$$\Phi_{\text{ДН}} = \Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi; \quad \Psi_{\text{ДН}} = \Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi, \quad (7)$$

причем результирующий угол отклонения $\Theta = \arccos(\cos \Theta)$ получим, исходя из соотношения для угла между вектором диаграммы направленности и вектором направления на КА:

$$\begin{aligned}\cos \Theta &= \cos(\alpha_{\text{ДН}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{КА}}) + \\ &+ \cos(\beta_{\text{ДН}}) \cdot \cos(\beta_{\text{КА}}) + \cos(\gamma_{\text{ДН}}) \cdot \cos(\gamma_{\text{КА}}),\end{aligned}\quad (8)$$

где в соответствии с (3):

$$\cos(\alpha_{\text{ДН}}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \quad (9)$$

$$\cos(\beta_{\text{ДН}}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \quad (10)$$

$$\cos(\gamma_{\text{ДН}}) = \sin(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi). \quad (11)$$

Амплитуда сигнала одиночной антенны при отклонении ее диаграммы на угол Θ будет равна

$$U_{c\Theta} = U_c \cdot F(\Theta), \quad (12)$$

где $F(\Theta)$ — нормированная диаграмма направленности одиночной параболической антенны, которую для оценочных расчетов аппроксимируем известным выражением [11]:

$$F(\Theta) = \exp[-a \cdot (\Theta/\Theta_{0,5})^2]. \quad (13)$$

Здесь $\Theta_{0,5}$ — половина ширины диаграммы направленности на уровне 0,5 мощности сигнала и на уровне 0,707 амплитуды сигнала, причем $a = 0,346574$.

Известно [11], что ширина диаграммы направленности антенны диаметром D на уровне 0,5 мощности сигнала определяется выражениями:

$$\begin{aligned}\Delta \Theta_{0,5} &= 1,12 \cdot \lambda/D \text{ (рад)} \\ \Delta \Theta_{0,5} &= 64 \cdot \lambda/D \text{ (}^\circ\text{)}.\end{aligned}\quad (14)$$

На рис. 4 фазовый центр (ФЦ) ЦАР имеет координаты

$$x_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} x_i/N; \quad y_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i/N; \quad z_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} z_i/N. \quad (15)$$

Разность хода лучей от КА до A_i и до ФЦ

$$\begin{aligned}\Delta R_{i\text{ц}} &= L_{i\text{ц}} \cdot \cos(\angle A_i - \text{ФЦ} - \text{КА}) = \\ &= L_{i\text{ц}} \cdot [\cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{КА}}) + \cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\beta_{\text{КА}}) + \\ &\quad + \cos(\gamma_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\gamma_{\text{КА}})].\end{aligned}\quad (16)$$

Расстояние от антенны ФЦ до антенны A_i

$$L_{i\text{ц}} = \sqrt{(x_i - x_{\text{фц}})^2 + (y_i - y_{\text{фц}})^2 + (z_i - z_{\text{фц}})^2} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{\text{КА}}) &= \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}); \\ \cos(\beta_{\text{КА}}) &= \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}}); \\ \cos(\gamma_{\text{КА}}) &= \sin(\Phi_{\text{КА}}); \end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{i\text{ц}}) &= (x_i - x_{\text{фц}})/L_{i\text{ц}}; \\ \cos(\beta_{i\text{ц}}) &= (y_i - y_{\text{фц}})/L_{i\text{ц}}; \\ \cos(\gamma_{i\text{ц}}) &= (z_i - z_{\text{фц}})/L_{i\text{ц}}.\end{aligned}\quad (19)$$

Набег времени относительно ФЦ

$$\Delta T_{i\text{ц}} = \Delta R_{i\text{ц}}/c, \quad (20)$$

где c — скорость света в свободном пространстве.

Сдвиг по фазе сигнала антенны A_i относительно ФЦ на промежуточной частоте f_n

$$\Delta \varphi_{i\text{ц}} = \omega_n \cdot \Delta T_{i\text{ц}} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i\text{ц}}. \quad (21)$$

Метод № 1: раздельное качание луча ЦАР по углу места и по азимуту относительно опорной антенны

Введем обозначения: $\Delta \Phi$ — физическое отклонение диаграммы направленности (ДН) ЦАР от цели по углу места;

μ — угол электронного отклонения ДН по углу места Φ ;

$+\mu$ — в сторону усугубления физического отклонения ($\Delta \Phi + \mu$);

$-\mu$ — в сторону компенсации физического отклонения ($\Delta \Phi - \mu$);

$\Delta \Psi$ — физическое отклонение от цели по азимуту;

ν — угол электронного отклонения ДН по азимуту Ψ ;

$+\nu$ — в сторону усугубления физического отклонения ($\Delta \Psi + \nu$);

$-\nu$ — в сторону компенсации физического отклонения ($\Delta \Psi - \nu$).

При электронном отклонении на угол $+\mu$ результирующие углы ДН

$$\Phi_{\text{ДН}} = \Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi + \mu; \quad \Psi_{\text{ДН}} = \Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi. \quad (1.1)$$

Разность хода лучей между A_i и A_0 для отклонения ДН на $+\mu$ по углу места при физических отклонениях на $\Delta \Phi$ по углу места и на $\Delta \Psi$ по азимуту

$$\begin{aligned} \Delta R_{i0+\mu} &= L_{i0} \cdot \cos(\angle A_i - 0 - \text{ДН}_{i+\mu}) = \\ &= L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{i0}) \cdot \cos(\alpha_{\text{ДН}+\mu}) + \\ &\quad + \cos(\beta_{i0}) \cdot \cos(\beta_{\text{ДН}+\mu}) + \\ &\quad + \cos(\gamma_{i0}) \cdot \cos(\gamma_{\text{ДН}+\mu})]; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_{\text{ДН}+\mu}) &= \\ &= \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi + \mu) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} \cos(\beta_{\text{ДН}+\mu}) &= \\ &= \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi + \mu) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\cos(\gamma_{\text{ДН}+\mu}) = \sin(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi + \mu). \quad (1.5)$$

Набег времени

$$\Delta T_{i0+\mu} = \Delta R_{i0+\mu}/c. \quad (1.6)$$

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_0 на промежуточной частоте f_n

$$\Delta \varphi_{i0+\mu} = \omega_n \cdot \Delta T_{i0+\mu} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i0+\mu}. \quad (1.7)$$

При электронном отклонении на угол $-\mu$ результирующие углы ДН

$$\Phi_{\text{ДН}} = \Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi - \mu; \quad \Psi_{\text{ДН}} = \Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi. \quad (1.8)$$

Разность хода лучей между A_i и A_0 для отклонения ДН на $-\mu$ по углу места при физических отклонениях на $\Delta \Phi$ по углу места и на $\Delta \Psi$ по азимуту

$$\begin{aligned} \Delta R_{i0-\mu} &= L_{i0} \cdot \cos(\angle A_i - 0 - \text{ДН}_{i-\mu}) = \\ &= L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{i0}) \cdot \cos(\alpha_{\text{ДН}-\mu}) + \cos(\beta_{i0}) \cdot \cos(\beta_{\text{ДН}-\mu}) + \\ &\quad + \cos(\gamma_{i0}) \cdot \cos(\gamma_{\text{ДН}-\mu})]; \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_{\text{ДН}-\mu}) &= \\ &= \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi - \mu) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \cos(\beta_{\text{ДН}-\mu}) &= \\ &= \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi - \mu) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}} + \Delta \Psi); \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$\cos(\gamma_{\text{ДН}-\mu}) = \sin(\Phi_{\text{КА}} + \Delta \Phi - \mu). \quad (1.12)$$

Набег времени

$$\Delta T_{i0-\mu} = \Delta R_{i0-\mu}/c. \quad (1.13)$$

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_0 на промежуточной частоте f_n

$$\Delta \varphi_{i0-\mu} = \omega_n \cdot \Delta T_{i0-\mu} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i0-\mu}. \quad (1.14)$$

Напряжение суммарного сигнала при электронном отклонении на $+\mu$

$$\overline{U}_{\Sigma+\mu} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) + j \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0+\mu})]. \quad (1.15)$$

Напряжение суммарного сигнала при электронном отклонении на $-\mu$

$$\overline{U}_{\Sigma-\mu} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0-\mu}) + j \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu})]. \quad (1.16)$$

Разность напряжений суммарных сигналов при электронных отклонениях на $\pm\mu$

$$\Delta\overline{U} = U_{c\Theta} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})] + j \cdot \sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right\}. \quad (1.17)$$

Модуль напряжения автосопровождения по углу места

$$|u_{ac\Phi}| = U_{c\Theta} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (1.18)$$

Знак напряжения сигнала автосопровождения по углу места

$$\text{sign}(u_{ac\Phi}) = \text{sign}([\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})]). \quad (1.19)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по углу места:

$$u_{ac\Phi} = \text{sign}([\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})]) \cdot U_{c\Theta} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (1.20)$$

При электронном отклонении на угол $+\nu$ результирующие углы ДН

$$\Phi_{\text{ДН}} = \Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi; \quad \Psi_{\text{ДН}} = \Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi + \nu. \quad (1.21)$$

Разность хода лучей между A_i и A_0 для отклонения ДН на $+\nu$ по азимуту при физических отклонениях на $\Delta\Phi$ по углу места и на $\Delta\Psi$ по азимуту

$$\Delta R_{i0+\nu} = L_{i0} \cdot \cos(\angle A_i - 0 - \text{ДН}_{i+\nu}) = L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{i0}) \cdot \cos(\alpha_{\text{ДН}+\nu}) + \cos(\beta_{i0}) \cdot \cos(\beta_{\text{ДН}+\nu}) + \cos(\gamma_{i0}) \cdot \cos(\gamma_{\text{ДН}+\nu})]; \quad (1.22)$$

$$\cos(\alpha_{\text{ДН}+\nu}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi + \nu); \quad (1.23)$$

$$\cos(\beta_{\text{ДН}+\nu}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi + \nu); \quad (1.24)$$

$$\cos(\gamma_{\text{ДН}+\nu}) = \sin(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi). \quad (1.25)$$

Набег времени

$$\Delta T_{i0+\nu} = \Delta R_{i0+\nu} / c. \quad (1.26)$$

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_0 на промежуточной частоте f_n

$$\Delta\varphi_{i0+\nu} = \omega_n \cdot \Delta T_{i0+\nu} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i0+\nu}. \quad (1.27)$$

При электронном отклонении на угол $-\nu$ результирующие углы ДН

$$\Phi_{\text{ДН}} = \Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi; \quad \Psi_{\text{ДН}} = \Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi - \nu. \quad (1.28)$$

Разность хода лучей между A_i и A_0 для отклонения ДН на $+\nu$ по азимуту при физических отклонениях на $\Delta\Phi$ по углу места и на $\Delta\Psi$ по азимуту

$$\Delta R_{i0-\nu} = L_{i0} \cdot \cos(\angle A_i - 0 - \text{ДН}_{i-\nu}) = L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{i0}) \cdot \cos(\alpha_{\text{ДН}-\nu}) + \cos(\beta_{i0}) \cdot \cos(\beta_{\text{ДН}-\nu}) + \cos(\gamma_{i0}) \cdot \cos(\gamma_{\text{ДН}-\nu})]; \quad (1.29)$$

$$\cos(\alpha_{\text{ДН}-\nu}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi - \nu); \quad (1.30)$$

$$\cos(\beta_{\text{ДН}-\nu}) = \cos(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}} + \Delta\Psi - \nu); \quad (1.31)$$

$$\cos(\gamma_{\text{ДН}-\nu}) = \sin(\Phi_{\text{КА}} + \Delta\Phi). \quad (1.32)$$

Набег времени

$$\Delta T_{i0-\nu} = \Delta R_{i0-\nu} / c. \quad (1.33)$$

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_0 на промежуточной частоте f_n

$$\Delta \varphi_{i0-\nu} = \omega_n \cdot \Delta T_{i0-\nu} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{i0-\nu}. \quad (1.34)$$

Напряжение суммарного сигнала при электронном отклонении на $+\nu$

$$\overline{U}_{\Sigma+\nu} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) + j \cdot \sin(\Delta \varphi_{i0+\nu})]. \quad (1.35)$$

Напряжение суммарного сигнала при электронном отклонении на $-\nu$

$$\overline{U}_{\Sigma-\nu} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta \varphi_{i0-\nu}) + j \cdot \sin(\Delta \varphi_{i0-\nu})]. \quad (1.36)$$

Разность напряжений суммарных сигналов при электронных отклонениях на $\pm \nu$

$$\Delta \overline{U} = U_{c\Theta} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta \varphi_{i0-\nu})] + j \cdot \sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \sin(\Delta \varphi_{i0-\nu})] \right\}. \quad (1.37)$$

Модуль напряжения автосопровождения по азимуту:

$$|u_{ac\Psi}| = U_{c\Theta} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta \varphi_{i0-\nu})] \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \sin(\Delta \varphi_{i0-\nu})] \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (1.38)$$

Знак напряжения сигнала автосопровождения по азимуту

$$\text{sign}(u_{ac\Psi}) = \text{sign}([\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta \varphi_{i0-\nu})]). \quad (1.39)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по азимуту

$$u_{ac\Psi} = \text{sign}([\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta \varphi_{i0-\nu})]) \cdot U_{c\Theta} \times$$

$$\times \left(\left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta \varphi_{i0-\nu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta \varphi_{i0+\nu}) - \sin(\Delta \varphi_{i0-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (1.40)$$

Итак, финальные выражения (1.20) и (1.40) дают оценки напряжений управляющих сигналов наведения антенн на КА по углу места Φ и азимуту Ψ по методу №1 раздельного электронного качания луча решетки на угол $\pm \mu$ по углу места и на угол $\pm \nu$ по азимуту.

Для оценки эффективности методов автосопровождения смоделируем зависимости от дискретного времени $\Delta t \cdot k$, $k = 0, 1, 2, \dots$, угла места $\Phi_{КА}$ и азимута $\Psi_{КА}$ космического аппарата при движении по круговой орбите высотой H и соответствующего изменения угла места $\Phi_{ДН}$ и азимута $\Psi_{ДН}$ диаграммы направленности каждой антенны решетки в соответствии с выражениями

$$\Phi_{ДН k} = \Phi_{ДН k-1} + K_{\Phi} \cdot u_{ac\Phi k} \quad (1.41)$$

$$\Delta \Phi_k = \Phi_{КА k} - \Phi_{КА k-1} \quad (1.42)$$

$$\Psi_{ДН k} = \Psi_{ДН k-1} + K_{\Psi} \cdot u_{ac\Psi k} \quad (1.43)$$

$$\Delta \Psi_k = \Psi_{КА k} - \Psi_{КА k-1}. \quad (1.44)$$

Здесь K_{Φ} и K_{Ψ} — коэффициенты передачи системы автосопровождения по углу места и азимуту соответственно.

Исходя из геометрических соотношений на рис. 1.1 и 1.2 нетрудно показать, что зависимости угла места $\Phi(t)$ и азимута $\Psi(t)$ от времени с момента прохождения КА восходящего узла определяются выражениями

$$\Phi(t) = \arcsin \left(\sin(\omega_{КА} t) \cdot \cos i - \frac{R}{R+H} \left/ \left([\cos(\omega_{КА} t)]^2 + [\sin(\omega_{КА} t) \cdot \sin i]^2 + \left[\sin(\omega_{КА} t) \cdot \cos i - \frac{R}{R+H} \right]^2 \right)^{1/2} \right. \right), \quad (1.45)$$

$$\Psi(t) = \arcsin \frac{\cos(\omega_{КА} t)}{\sqrt{[\cos(\omega_{КА} t)]^2 + [\sin(\omega_{КА} t) \cdot \sin i]^2}}. \quad (1.46)$$

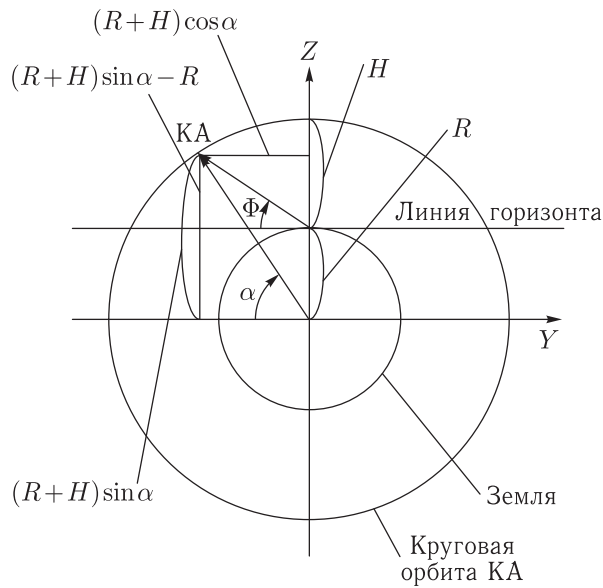


Рис. 1.1. Связь между направлениями на КА от наблюдателя и из центра Земли при пролете через зенит наблюдателя

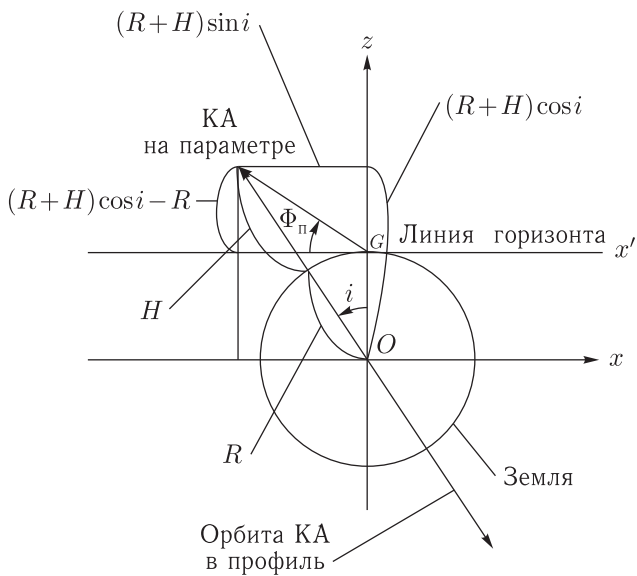


Рис. 1.2. Орбита КА в профиль с отклонением от зенита наблюдателя

При этом азимут начала $\Psi_{нз}$ и конца $\Psi_{кз}$ зоны радиовидимости определяется выражениями:

$$\Psi_{нз} = \arcsin \frac{\cos \alpha_0}{\sqrt{[\cos \alpha_0]^2 + [\sin \alpha_0 \cdot \sin i]^2}}, \quad (1.47)$$

$$\Psi_{кз} = \arcsin \frac{\cos(\pi - \alpha_0)}{\sqrt{[\cos(\pi - \alpha_0)]^2 + [\sin(\pi - \alpha_0) \cdot \sin i]^2}}. \quad (1.48)$$

Графики автосопровождения по углу места и азимуту по равносигнальному методу № 1 представлены на рис. 1.3.

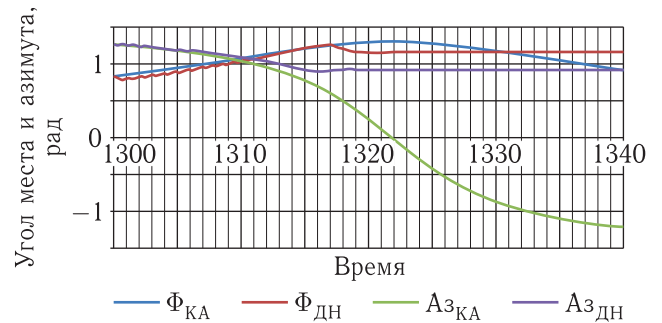


Рис. 1.3. Графики автосопровождения по углу места и азимуту по равносигнальному методу № 1

Из рис. 1.3 видно, что автосопровождение по методу 1 срывается при подходе к зениту, где этот метод нечувствителен к изменению азимута.

Вывод простой: надо смотреть альтернативные методы автосопровождения ЦАР.

Метод № 2: совместное качание луча по углу места и по азимуту относительно опорной антенны

Напряжение сигнала автосопровождения по оси $+45^\circ$

$$u_{ac\Phi} = \text{sign} \left([\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu-\nu})] \right) \times \\ \times \left(\left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu-\nu})] \right\}^2 + \right. \\ \left. + \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\mu+\nu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (2.1)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по оси -45° :

$$u_{ac-45^\circ} = \text{sign} \left([\cos(\Delta\varphi_{i0-\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0+\mu-\nu})] \right) \times$$

$$\times \left(\left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0-\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0+\mu-\nu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0-\mu+\nu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0+\mu-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (2.2)$$

Графики автосопровождения по оси $+45^\circ$ и по оси -45° по равноточному методу № 2 представлены на рис. 2.1 для всей зоны радиовидимости и на рис. 2.2 для околосенитной области. Здесь тщательно подобраны параметры: $\mu = 0,5^\circ$, $\nu = 0,75^\circ$, $K_\Phi = 0,009$, $K_\Psi = 0,05$.

Анализ рис. 2.1 показывает, что автосопровождение по 2-му методу при тщательном подборе параметров (размаха отклонения и коэффициентов передачи по углу места и азимута) позволяет пройти околосенитную область ЗРВ, но малейшее отклонение от эмпирически найденного удовлетворительного набора параметров ведет к рассогласованию системы автосопровождения ЦАР. Для полноты

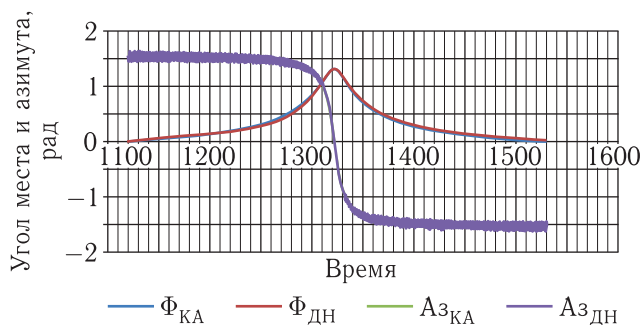


Рис. 2.1. Графики автосопровождения для всей зоны радиовидимости

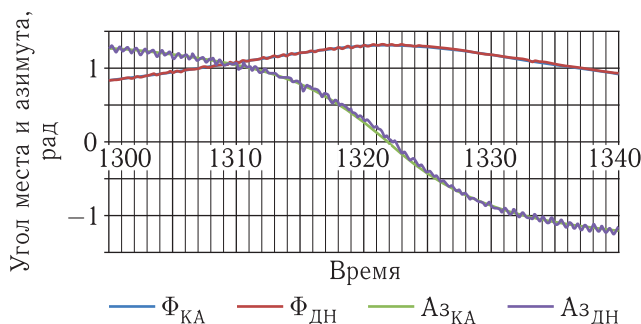


Рис. 2.2. Графики автосопровождения для околосенитной области

картины остается проверить разновидности методов 1 и 2 при отсчете фазовых сдвигов в антеннах относительно фазового центра решетки.

Метод № 3: раздельное качение луча по углу места и азимуту относительно фазового центра ЦАР

Фазовый центр (ФЦ) ЦАР имеет координаты:

$$x_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} x_i/N; \quad y_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i/N; \quad z_{\text{фц}} = \sum_{i=0}^{N-1} z_i/N. \quad (3.1)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по углу места

$$u_{\text{ас}\Phi} = \text{sign} \left(\sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i\text{ц}+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i\text{ц}-\mu})] \right) \times U_{\text{с}\Theta} \cdot \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\mu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\mu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (3.2)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по азимуту

$$u_{\text{ас}\Psi} = \text{sign} \left(\sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\nu})] \right) \times U_{\text{с}\Theta} \cdot \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i0+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\nu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i0+\nu}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (3.3)$$

Результаты моделирования системы автосопровождения по методу 3 с параметрами метода 1 ($\mu = 1,7^\circ$, $\nu = 5,5^\circ$, $K_\Phi = 0,005$, $K_\Psi = 0,005$) представлены на рис. 3.1 для всей ЗРВ и на рис. 3.2 для околосенитной области.

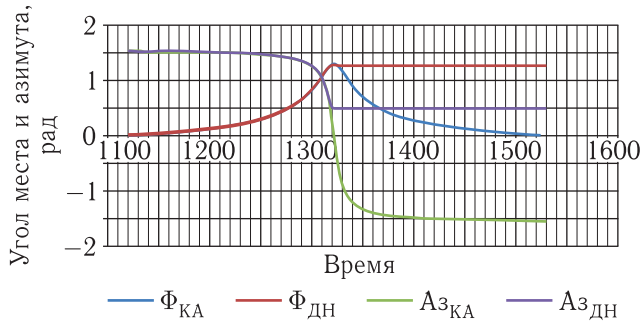


Рис. 3.1. Графики автосопровождения для всей зоны радиовидимости

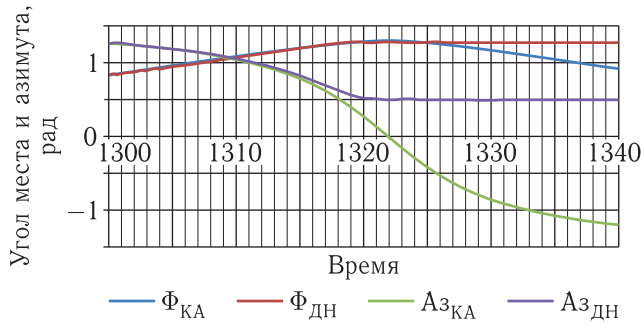


Рис. 3.2. Графики автосопровождения для околоразенитной области

Если не подбирать тщательно параметры, то результат аналогичен методу 1: автосопровождение по методу 3 срывается при подходе к зениту, где этот метод нечувствителен к изменению азимута. Это наводит на мысль о целесообразности разработки метода 4, который является усовершенствованием метода 2 одновременного качания по углу места и азимута сначала под углом $+45^\circ$, а потом под углом -45° .

Метод № 4: одновременное качание луча по углу места и азимуту относительно фазового центра сначала под углом $+45^\circ$, а потом под углом -45°

Напряжение сигнала автосопровождения по оси $+45^\circ$

$$u_{ac\Phi} = \text{sign} \left(\sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i\psi+\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i\psi-\mu-\nu})] \right) \times$$

$$\times U_{c\Theta} \times \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i\psi+\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i\psi-\mu-\nu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i\psi+\mu+\nu}) - \sin(\Delta\varphi_{i\psi-\mu-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}, \quad (4.1)$$

$$u_{ac-45^\circ} = \text{sign} \left(\sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i\psi-\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i\psi+\mu-\nu})] \right) \cdot U_{c\Theta} \times \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\cos(\Delta\varphi_{i\psi-\mu+\nu}) - \cos(\Delta\varphi_{i\psi+\mu-\nu})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} [\sin(\Delta\varphi_{i\psi-\mu+\nu}) - \sin(\Delta\varphi_{i\psi+\mu-\nu})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (4.2)$$

Графики автосопровождения по оси $+45^\circ$ и по оси -45° по равносигнальному методу № 4 в широком диапазоне углов качания по азимуту представлены на рис. 4.1, 4.2. Метод 4 сохраняет устойчивость в достаточно широком диапазоне параметров. Так, по азимутальному углу качания ν устойчивость метода сохраняется от $\nu = 0,84^\circ$ до $\nu = 2,8^\circ$ для сопровождения по всей ЗРВ и до $\nu = 3,3^\circ$ для сопровождения в околоразенитной зоне.

Вместе с тем метод 4 обладает общим недостатком методов сопровождения по отклонению

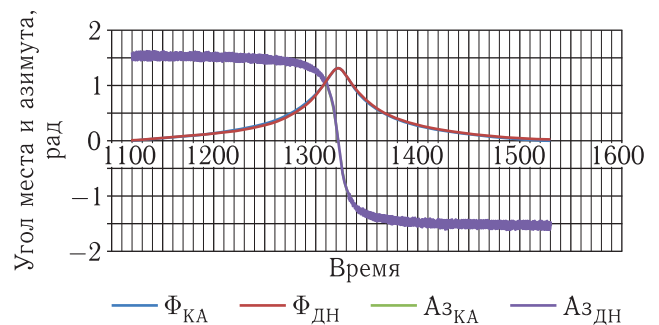


Рис. 4.1. Графики автосопровождения для всей зоны радиовидимости ($\mu = 0,5^\circ$, $\nu = 0,9^\circ$, $K_\Phi = -0,009$, $K_\Psi = -0,05$, $K_{+45} = -0,55$, $K_{-45} = 0,55$)

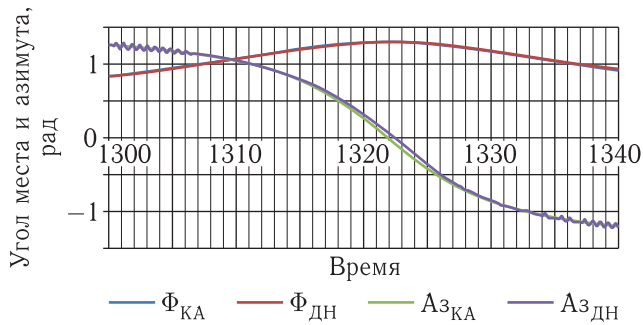


Рис. 4.2. Графики автосопровождения для околоразнотной области ($\mu = 0,5^\circ$, $\nu = 0,9^\circ$, $K_\Phi = -0,009$, $K_\Psi = -0,05$, $K_{+45} = -0,55$, $K_{-45} = 0,55$)

углов места и азимута, а именно: изменение углов места и азимута ведет к необходимости синхронного пересчета и изменения фазовых сдвигов на устройстве фазирования антенн. Поэтому целесообразно рассмотреть семейство равносигнальных методов на фоне разностных методов автосопровождения цели цифровой антенной решеткой.

Метод № 5: разностный с опорной антенной

Идея метода: 1) из суммарного сигнала ближней к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал дальней от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по углу места;

2) из суммарного сигнала левой по отношению к КА половины антенного поля вычесть суммарный сигнал правой по отношению к КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по азимуту.

Как определить состав антенн «ближе-дальше» и «справа-слева» при постоянно изменяющемся азимуте КА?

С понятиями «ближе-дальше» проще. Достаточно по направляющим косинусам рассчитать косинус разности азимутов антенны и КА. Если знак этого косинуса больше нуля (угол между азимутами меньше 90°), то антенна в ближней половине, если меньше нуля (угол между азимутами больше 90°), то антенна в дальней половине.

Расстояние от антенны ФЦ до антенны A_i

$$L_{i\Gamma} = \sqrt{(x_i - x_{\text{фц}})^2 + (y_i - y_{\text{фц}})^2 + (z_i - z_{\text{фц}})^2}; \quad (5.1)$$

$$\cos(\alpha_{\text{КА}}) = \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}); \quad (5.2)$$

$$\cos(\beta_{\text{КА}}) = \cos(\Phi_{\text{КА}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}}); \quad (5.3)$$

$$\cos(\gamma_{\text{КА}}) = \sin(\Phi_{\text{КА}}); \quad (5.4)$$

$$\cos(\alpha_{i\Gamma}) = (x_i - x_{\text{фц}})/L_{i\Gamma}; \quad (5.5)$$

$$\cos(\beta_{i\Gamma}) = (y_i - y_{\text{фц}})/L_{i\Gamma}; \quad (5.6)$$

$$\cos(\gamma_{i\Gamma}) = (z_i - z_{\text{фц}})/L_{i\Gamma}. \quad (5.7)$$

На горизонтальной плоскости

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_{i\Gamma}) &= (x_i - x_{\text{фц}})/L_{i\Gamma} = \\ &= (x_i - x_{\text{фц}})/(L_{i\Gamma} \cdot \sin(\gamma_{i\Gamma})) = \cos(\alpha_{i\Gamma})/\sin(\gamma_{i\Gamma}); \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \cos(\beta_{i\Gamma}) &= (y_i - y_{\text{фц}})/L_{i\Gamma} = \\ &= (y_i - y_{\text{фц}})/(L_{i\Gamma} \cdot \cos(\gamma_{i\Gamma})) = \cos(\beta_{i\Gamma})/\sin(\gamma_{i\Gamma}); \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\cos(\alpha_{\text{КА}\Gamma}) = \sin(\Psi_{\text{КА}}); \quad (5.10)$$

$$\cos(\beta_{\text{КА}\Gamma}) = \cos(\Psi_{\text{КА}}); \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \cos[\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)] &= \\ &= \cos(\alpha_{i\Gamma}) \cdot \cos(\alpha_{\text{КА}\Gamma}) + \cos(\beta_{i\Gamma}) \cdot \cos(\beta_{\text{КА}\Gamma}) = \\ &= \cos(\alpha_{i\Gamma})/\sin(\gamma_{i\Gamma}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) + \\ &+ \cos(\beta_{i\Gamma})/\sin(\gamma_{i\Gamma}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}}). \end{aligned} \quad (5.12)$$

Отсюда условие «ближе-дальше»:

$$\begin{aligned} \text{если } \cos(\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)) &> 0, \\ \text{то } A_i &\text{ ближе, чем ФЦ}; \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \text{если } \cos(\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)) &< 0, \\ \text{то } A_i &\text{ дальше, чем ФЦ}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Для понятий «справа-слева» справедливо следующее правило:

$$\begin{aligned} \text{если } \sin(\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)) &> 0, \\ \text{то } A_i &\text{ левее, чем ФЦ}; \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} \text{если } \sin(\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)) &< 0, \\ \text{то } A_i &\text{ правее, чем ФЦ}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Однако синус угла между векторами вычислять гораздо сложнее, поэтому сведем вычисление

синуса к вычислению косинуса, используя следующие формулы приведения:

$$\cos(\varphi + \pi/2) = -\sin(\varphi); \quad (5.17)$$

$$\sin(\varphi + \pi/2) = \cos(\varphi). \quad (5.18)$$

Используя (5.18), получаем:

$$\begin{aligned} \sin[\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)] &= \\ &= -\cos\{\angle[(\text{азимут КА} + \pi/2) - \text{азимут } A_i]\}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

С учетом (5.13) из (5.20) получаем:

$$\begin{aligned} \sin[\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)] &= \\ &= -\{\cos(\alpha_{iц})/\sin(\gamma_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА} + \pi/2) + \\ &+ \cos(\beta_{iц})/\sin(\gamma_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА} + \pi/2)\}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

С учетом (5.17) и (5.18) из (5.20) получаем:

$$\begin{aligned} \sin[\angle(\text{азимут КА} - \text{азимут } A_i)] &= \\ &= -\cos(\alpha_{iц})/\sin(\gamma_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА}) + \\ &+ \cos(\beta_{iц})/\sin(\gamma_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}). \end{aligned} \quad (5.21)$$

Теперь определим разности суммарных сигналов ближней-дальней и правой-левой половин антенного поля с опорной антенной.

Разность напряжений между ближней и дальней половинами поля ЦАР:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_{Б-Д} &= U_{с\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \\ &+ \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \cos(\gamma_{iц}) \} \times \\ &\times [\cos(\Delta\varphi_{i0}) + j \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0})]. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Модуль напряжения автосопровождения по углу места

$$\begin{aligned} |u_{ac\Phi}| &= U_{с\Theta} \times \\ &\times \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \cdot \cos(\Delta\varphi_{i0}) \right\}^2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \right. \\ &\left. + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0}) \right\}^2 \Big)^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Знак напряжения сигнала автосопровождения по углу места определяется косинусной составляющей разностного сигнала:

$$\begin{aligned} \text{SIGN}(u_{ac\Phi}) &= \\ &= \text{SIGN} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \right. \\ &\left. + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \cdot \cos(\Delta\varphi_{i0}) \right). \end{aligned} \quad (5.24)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по углу места

$$u_{ac\Phi} = \text{SIGN}(u_{ac\Phi}) \cdot |u_{ac\Phi}|. \quad (5.25)$$

Разность напряжений между правой и левой половинами поля ЦАР

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_{П-Л} &= U_{с\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) - \\ &- \cos(\alpha_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \cos(\gamma_{iц}) \} \times \\ &\times [\cos(\Delta\varphi_{i0}) + j \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0})]. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Модуль напряжения автосопровождения по азимуту

$$\begin{aligned} |u_{ac\Psi}| &= U_{с\Theta} \times \\ &\times \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) - \right. \right. \\ &\left. \left. - \cos(\alpha_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \cdot \cos(\Delta\varphi_{i0}) \right\}^2 + \right. \\ &+ \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) - \right. \\ &\left. - \cos(\alpha_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \cdot \sin(\Delta\varphi_{i0}) \right\}^2 \Big)^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Знак напряжения сигнала автосопровождения по азимуту определяется косинусной составляющей разностного сигнала:

$$\begin{aligned} \text{SIGN}(u_{\text{ac}\Psi}) = \\ = \text{SIGN} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \left\{ \left[\cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cos(\Psi_{\text{КА}}) \right] / \sin(\gamma_{i\text{ц}}) \right\} \cdot \cos(\Delta\varphi_{i0}) \right). \end{aligned} \quad (5.28)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по азимуту

$$u_{\text{ac}\Phi} = \text{SIGN}(u_{\text{ac}\Psi}) \cdot |u_{\text{ac}\Psi}|. \quad (5.29)$$

Графики автосопровождения по углу места и азимуту по равносигнальному методу № 5 представлены на рис. 5.1 и 5.2.

При тщательном подборе параметров метод 5 начинает работать в околоразностной области (рис. 5.2), но не работает по всей ЗРВ (рис. 5.1). Вывод: методу 5 не хватает чувствительности. Поэтому рассмотрим модификацию метода 5 с фазовым центром.

Метод № 6: разностный с фазовым центром

Идея метода: фазы сигналов всех антенн отсчитываются от фазового центра поля ЦАР. Далее — как в методе 5.

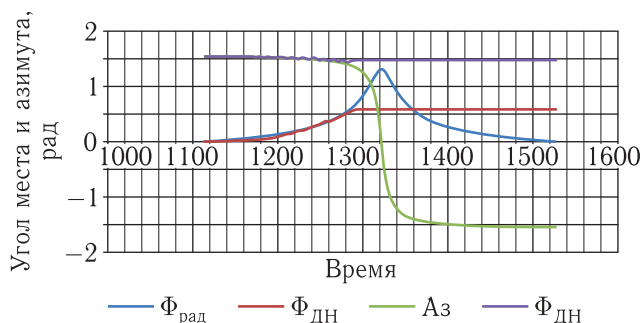


Рис. 5.1. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 5 по всей ЗРВ ($K_{\Phi} = 0,007$, $K_{\Psi} = 0,003$)

Графики автосопровождения по углу места и азимуту по равносигнальному методу № 5 представлены на рис. 6.1.

Из графиков рис. 6.1 видно, что чисто разностный метод по фазовому центру не дает повышения чувствительности.

Вывод: целесообразно рассмотреть разностно-равносигнальные методы.

Метод № 7: разностно-равносигнальный с опорной антенной

Идея метода:

1) на каждой антенне к разности фаз с опорной антенной добавляется сдвиг по фазе на $+\Delta\xi$ и вычитается сдвиг по фазе $-\Delta\xi$. В случае $+\Delta\xi$ это эквивалентно электронному (то есть без изменения амплитуды сигнала) наклону диаграммы направленности антенны на некоторый угол в сторону КА, а в случае $-\Delta\xi$ — эквивалентно электронному наклону антенны на некоторый угол в сторону от КА.

При этом в одном из этих случаев рассогласование диаграммы направленности по углу места усугубляется, а в другом — компенсируется. Аналогично при разбиении антенного поля на правую и левую половину сдвиги по фазе эквивалентны качанию диаграммы вправо-влево, что в одном из этих случаев ведет к усугублению рассогласования по азимуту, а в другом — к компенсации рассогласования по азимуту. Управляющими сигналами по

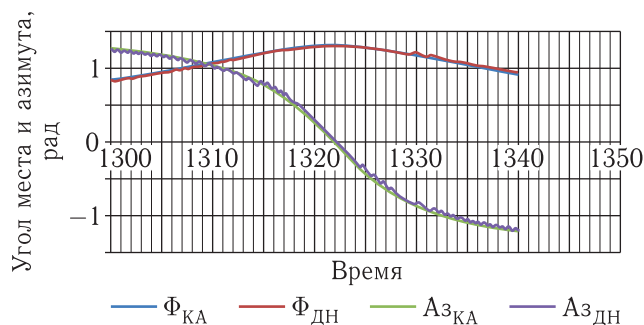


Рис. 5.2. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 5 в околоразностной области ($K_{\Phi} = -0,0015$, $K_{\Psi} = -0,0055$)

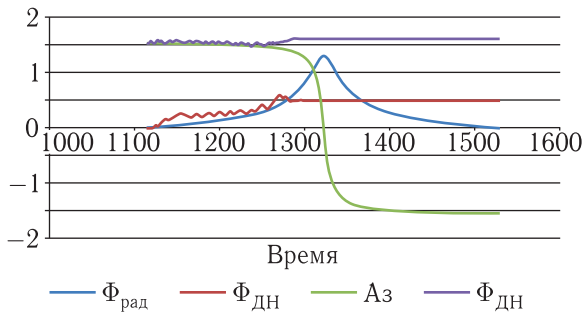


Рис. 6.1. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 6 по всей ЗРВ ($K_{\Phi} = -0,0015$, $K_{\Psi} = -0,0055$)

углу места и азимуту являются формируемые далее разностные сигналы;

2) на каждой антенне из сигнала с положительным фазовым сдвигом на $+\Delta\xi$ вычитается сигнал с отрицательным фазовым сдвигом на $-\Delta\xi$;

3) полученные разностные сигналы антенн складываются отдельно для ближней-дальней и правой-левой половины антенного поля;

4) для получения управляющего сигнала по наведению антенны по направлению «ближе-дальше» из суммы разностных сигналов ближней к КА половины антенного поля вычесть сумму разностных сигналов дальней от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по углу места;

5) для получения управляющего сигнала по наведению антенны по направлению «справа-слева» из суммы разностных сигналов правой по отношению к КА половины антенного поля вычесть сумму разностных сигналов левой от КА половины антенного поля и получить тем самым управляющий сигнал по азимуту.

Разностный сигнал на антенне

$$\Delta\bar{U}_{i0+\xi-(-\xi)} = U_{c\Theta} \cdot \{ \cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi}) + j \cdot [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \}. \quad (7.1)$$

Разность сумм разностных сигналов между ближней и дальней половинами поля ЦАР

$$\Delta\bar{U}_{Б-Д} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \cos(\gamma_{iц}) \} \times \{ \cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi}) +$$

$$+ j \cdot [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \}. \quad (7.2)$$

Модуль сигнала автосопровождения по углу места

$$|u_{ac\Phi}| = U_{c\Theta} \cdot \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \times [\cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \times [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (7.3)$$

Здесь следует учесть, что для опорной антенны $\Delta T_{00} = 0$ и, следовательно, $\Delta\varphi_{00} = 0$.

Знак сигнала автосопровождения по углу места определяется косинусной составляющей разностного сигнала

$$\begin{aligned} \text{SIGN}(u_{ac\Phi}) &= \\ &= \text{SIGN} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \sin(\gamma_{iц}) \} \times [\cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \right). \end{aligned} \quad (7.4)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по углу места

$$u_{ac\Phi} = \text{SIGN}(u_{ac\Phi}) \cdot |u_{ac\Phi}|. \quad (7.5)$$

Разность сумм разностных сигналов между правой и левой половинами поля ЦАР

$$\Delta\bar{U}_{Б-Д} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\alpha_{iц}) \cdot \sin(\Psi_{КА}) + \cos(\beta_{iц}) \cdot \cos(\Psi_{КА})] / \cos(\gamma_{iц}) \} \times \{ \cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi}) + j \cdot [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \}, \quad (7.6)$$

$$\Delta \bar{U}_{\Pi-L} = U_{c\Theta} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) - \cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}})] / \cos(\gamma_{i\text{ц}}) \} \times \\ \times \{ \cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi}) + \\ + j \cdot [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \}. \quad (7.7)$$

Модуль напряжения автосопровождения по азимуту

$$|u_{ac\Psi}| = U_{c\Theta} \cdot \left(\left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) - \cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}})] / \sin(\gamma_{i\text{ц}}) \} \times \right. \right. \\ \times [\cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \left. \right\}^2 + \\ + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) - \cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}})] / \sin(\gamma_{i\text{ц}}) \} \times \right. \\ \left. \times [\sin(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \sin(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \left. \right\}^2 \right)^{1/2}. \quad (7.8)$$

Здесь следует учесть, что для опорной антенны $\Delta T_{00} = 0$ и, следовательно, $\Delta\varphi_{00} = 0$.

Знак напряжения сигнала автосопровождения по азимуту определяется косинусной составляющей разностного сигнала

$$\text{SIGN}(u_{ac\Psi}) = \\ = \text{SIGN} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \text{SIGN} \{ [\cos(\beta_{i\text{ц}}) \cdot \sin(\Psi_{\text{КА}}) - \cos(\alpha_{i\text{ц}}) \cdot \cos(\Psi_{\text{КА}})] / \sin(\gamma_{i\text{ц}}) \} \times \right. \\ \left. \times [\cos(\Delta\varphi_{i0+\xi}) - \cos(\Delta\varphi_{i0-\xi})] \right). \quad (7.9)$$

Напряжение сигнала автосопровождения по азимуту

$$u_{ac\Phi} = \text{SIGN}(u_{ac\Psi}) \cdot |u_{ac\Psi}|. \quad (7.10)$$

Графики автосопровождения по углу места и азимуту по разностному равносигнальному методу № 7 представлены на рис. 7.1 и 7.2.

Метод работает устойчиво в достаточно широком диапазоне коэффициентов передачи по углу места и азимуту, а также амплитуд отклонения

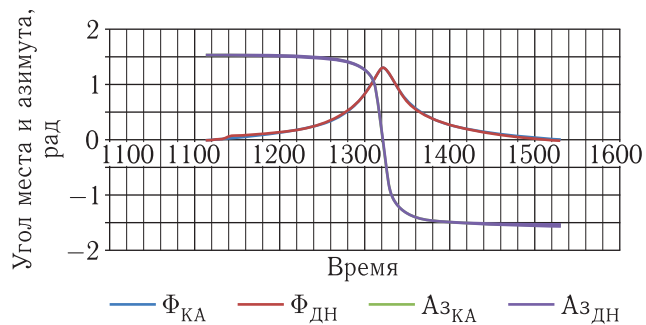


Рис. 7.1. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 7 по всей ЗРВ ($K_{\Phi} = -0,003$, $K_{\Psi} = -0,008$, $\xi = 16,2^\circ$, $\Phi_{\Pi} = 74,8^\circ$)

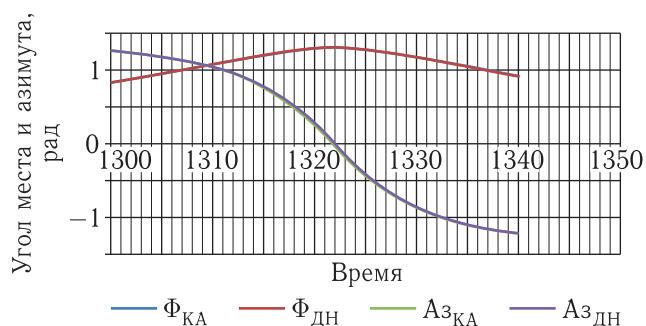


Рис. 7.2. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 7 в околозенитной области ($K_{\Phi} = -0,003$, $K_{\Psi} = -0,008$, $\xi = 16,2^\circ$, $\Phi_{\Pi} = 74,8^\circ$)

фазы сигнала относительно указанной на рис. 7.1 и 7.2 рабочей точки, а именно для орбиты с углом на параметре $\Phi_{\Pi} = 74,8^\circ$ в диапазоне Д2, что соответствует отклонению от зенита на ширину диаграммы направленности в диапазоне М1:

$$K_{\Phi} = \text{от } -0,0009 \text{ до } -0,0075;$$

$$K_{\Psi} = \text{от } -0,0045 \text{ до } -0,011;$$

$$\xi = \text{от } 9,18^\circ \text{ до } 22,86^\circ.$$

Анализа разновидности метода с отсчетом фазовых сдвигов антенн относительно фазового центра не требуется, так как в методах автосопровождения с использованием фазового центра нечем измерять опорный сигнал в фазовом центре, в то время как в методах с опорной антенной все сигналы физически осязаемы, причем для автосопровождения цели антенным полем на базе ЦАР на каждой антенне достаточно иметь три АЦП соответственно с тремя блоками фазирования.

Т а б л и ц а . Координаты, расстояния и направляющие косинусы антенн

Номер антенны	X	Y	Z	L_{i0}	$\cos \alpha_{i0}$	$\cos \beta_{i0}$	$\cos \gamma_{i0}$
0	0	0	0	0			
1	45	0	3	45,09989	0,997785	0	0,066519
2	43	37	2	56,76266	0,75754	0,651836921	0,035234
3	0	38	4	38,20995	0	0,994505453	0,104685
4	21	-19	3,5	28,53507	0,735937	-0,66584741	0,122656
5	67	20	5	70,09993	0,955778	0,285306995	0,071327
6	24	59	1	63,70243	0,376752	0,926181262	0,015698
7	-22	21	2	30,4795	-0,7218	0,688987651	0,065618

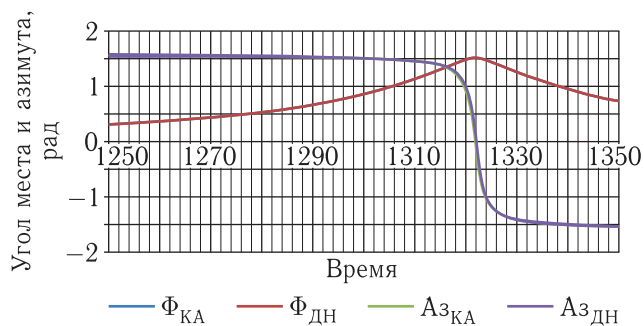


Рис. 7.3. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 7 по средней части ЗРВ ($K_{\Phi} = -0,003$, $K_{\Psi} = -0,008$, $\xi = 18^\circ$, $\Phi_{\Pi} = 87,04^\circ$)

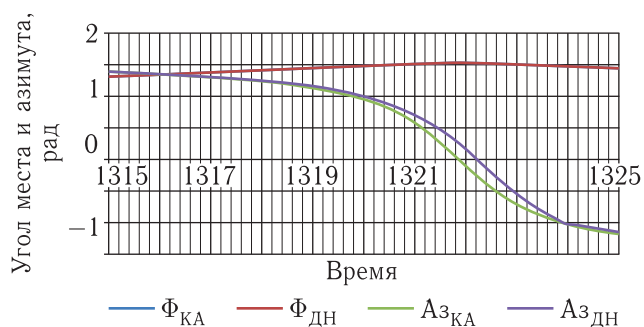


Рис. 7.4. Автосопровождение по углу места и азимуту методом 7 в околоразенитной области ($K_{\Phi} = -0,003$, $K_{\Psi} = -0,008$, $\xi = 16,2^\circ$, $\Phi_{\Pi} = 87,04^\circ$)

Как показано на рис. 7.3 и 7.4, метод 7 вполне успешно работает в околоразенитной области при угле на параметре $\Phi_{\Pi} = 87,04^\circ$, что соответствует отклонению от зенита на ширину диаграммы направленности в диапазоне Д1.

Возможен вариант реализации разностно-равносигнального метода с электронным качанием отклонением луча и расположением половин антенного поля под углом 45° , но проведенное моделирование показало худшие характеристики такого варианта по сравнению с описанным в данном разделе.

Отметим, что представленные графики рассчитаны для антенного поля из 8 антенн с разбросом координат, показанным в таблице.

Расчеты проведены для неровного поля с перепадом высот в 5 м. Интересно, что неровности рельефа мало влияют на прохождение зенита.

Таким образом, путем анализа возможных вариантов реализации синтезирован разностно-равносигнальный метод автосопровождения цели неэквидистантной широкополосной цифровой антенной решеткой с опорной антенной, устойчивый во всей зоне радиовидимости космического аппарата, включая околоразенитную область, и нечувствительный к неровностям поверхности антенного поля.

Список литературы

1. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля, 2008, № 4. С. 10–15.
2. Волощук И.В., Королев Н.А., Никитин Н.М., Солощев О.Н., Шацман Л.Г., Алесин А.М. Развитие радиолокационных средств боевых кораблей на основе технологии цифровых антенных решеток // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної Зірки

- інституту ім. П. С. Нахімова. Севастополь: СВМІ ім. П. С. Нахімова, 2007. Вип. 2(12). 260 с.
3. *Skolnik M.I.* Radar Handbook. Third Ed. McGraw-Hill Book Company, May 11 2008, ISBN 0071485473.
4. *Слюсар В.* Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации // *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2001, № 3. С. 42–46.
5. *Слюсар В.* SMART-антенны пошли в серию // *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2004, № 2. С. 62–65.
6. The Path to 4G Mobile // *Communications Week International*, 2001, Issue 260.
7. *Слюсар В.* Цифровые антенные решетки решения задач GPS // *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 1. С. 74–78.
8. *Backen S., Akos D.M.* Research Report «GNSS Antenna Arrays. Hardware requirements for algorithm implementation» / Lulea University of Technology. Department of Computer Science and Electrical Engineering. April 4, 2006. <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2006/13/LTU-FR-0613-SE.pdf>
9. *Ватутин С.И., Зайцев О.В.* Применение многоканальных цифровых приемных устройств для создания антенных полей НАКУ КА. Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. 2013. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 5–7 июня 2013 г. М.: 2014. С. 103–120.
10. *Ватутин С.И., Зайцев О.В.* Патент на изобретение № 2594385 «Способ обработки широкополосных сигналов и устройство фазирования антенн приема широкополосных сигналов, преимущественно для антенн неэквидистантной решетки». Патентообладатель: ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (ОАО «Российские космические системы»). Заявка № 2015119423. Приоритет изобретения 25 мая 2015 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 22 июня 2016 г.
11. *Фролов О.П.* Антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Радио и связь, 2000. 376 с.