

УДК 621.396.677

Цифровое фазирование для повышения эффективности применения антенной системы Б-529

С. И. Вату́тин¹, О. В. Зайцев

¹к. т. н., АО «Российские космические системы»

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru, pochta-ov@mail.ru

Аннотация. Изложены предложения по практическому достижению идеальных отношений сигнал/шум в приемном тракте антенной системы Б-529 путем цифрового фазирования четырех антенн этой системы. Предложен цифровой равносигнальный метод формирования разностных сигналов наведения по суммарному сигналу от всех четырех антенн системы Б-529, позволяющий вдвое увеличить отношение сигнал/шум в тракте наведения антенны по сравнению с традиционным методом наведения по суммарно-разностным сигналам. Результаты работы могут быть использованы при модернизации антенной системы Б-529 путем перевода ее приемного тракта и тракта наведения на цифровую обработку радиосигналов.

Ключевые слова: антенная система, синфазная антенная решетка, приемник, цифровое фазирование, промежуточная частота, разность хода лучей, равносигнальный метод, суммарно-разностный сигнал

Digital Phasing to Increase Application Efficiency of the B-529 Antenna System

S. I. Vatutin¹, O. V. Zaytsev

¹candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: otd0943_vsi@mail.ru, pochta-ov@mail.ru

Abstract. This article describes the proposals for practical achievements of the ideal signal-to-noise ratio in the receive path of the B-529 antenna system by means of digital phasing of four antennas of this system. A digital equisignal forming method of difference guidance signals from the sum signal from four antennas of the B-529 system is proposed. It is stressed that this method allows to increase twice a signal-to-noise ratio in the antenna guidance path in comparison with a traditional guidance method from sum and difference signals. It is reported that the results can be used when modernizing the B-529 antenna system through transferring its receive path and guidance path to digital processing of radio signals.

Key words: antenna system, cophased array, receiver, digital phasing, intermediate frequency, path-length difference, equisignal method, sum and difference signal

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу аналоговых и цифровых способов фазирования сигналов с четырех антенн системы Б-529, которые смонтированы на общей раме и образуют синфазную антенную решетку (см. рис. 1).

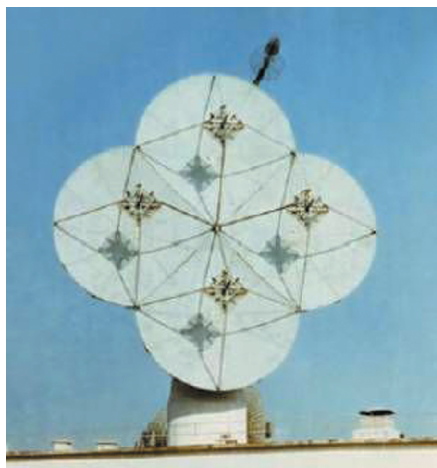


Рис. 1. Внешний вид антенной системы Б-529

Структурная схема синфазной решетки антенной системы Б-529 представлена на рис. 2.

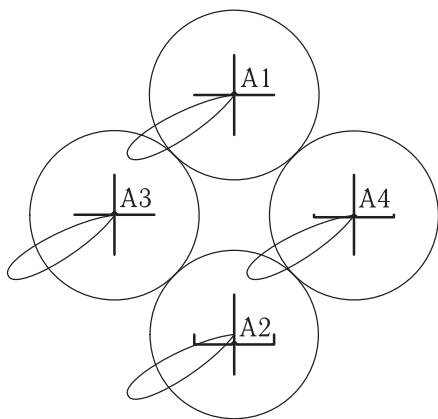


Рис. 2. Структурная схема антенной системы Б-529

Сравнение аналогового и цифрового способов обработки и фазирования сигналов с четырех антенн системы Б-529 проведем в одинаковых условиях, когда малошумящие усилители установлены непосредственно на облучатели антенн и потерями в соединительных кабелях до кольцевых мостов и приемников от 1 дБ в метровом диапазоне до 2–2,5 дБ в верхних дециметровых диапазонах можно пренебречь.

В соответствии с рис. 2 обозначим через А1 верхнюю антенну, А2 — нижнюю, А3 — левую и А4 — правую антенну, Ψ — азимут, $\Phi_{КА}$ — угол места направления на КА, $\Delta\Psi$ — отклонение по азимуту, $\Delta\Phi$ — отклонение по углу места от направления на КА. При анализе примем, что фазовый центр синфазной решетки Б-529 находится на пересечении отрезков прямых, соединяющих фазовые центры антенн А1–А2 и А3–А4.

На рис. 3 представлена геометрическая модель для расчета фазовых набегов в антеннах А1–А4 относительно фазового центра 0 решетки, возникающих при отклонении оси диаграммы направленности от направления на КА на угол $\Delta\Psi$ по азимуту и $\Delta\Phi$ по углу места.

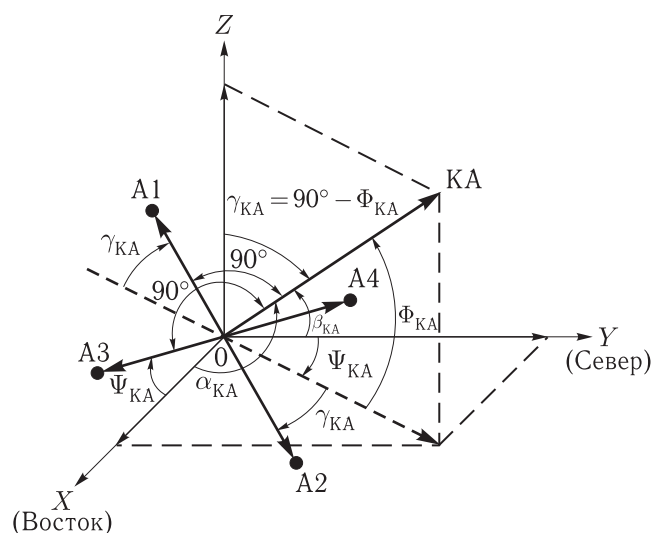


Рис. 3. Геометрическая модель синфазной антенной решетки Б-529

Разность хода лучей от КА на антенну ΔR_{i0} относительно фазового центра решетки равна длине проекции вектора фазового центра антенны на вектор направления на КА и определяется известной формулой для угла между векторами через направляющие косинусы:

$$\Delta R_{i0} = L_{i0} \cdot [\cos(\alpha_{Ai}) \cdot \cos(\alpha_{KA}) + \cos(\beta_{Ai}) \cdot \cos(\beta_{KA}) + \cos(\gamma_{Ai}) \cdot \cos(\gamma_{KA})]. \quad (1)$$

Здесь L_{i0} — расстояние от фазового центра решетки до фазового центра антенны Ai . При диаметре антенны $D = 6$ м $L_{i0} = D/\sqrt{2} = 4,24$ м.

Нетрудно показать, что направляющие косинусы направления на КА и антенн А1–А4 определяются выражениями:

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{KA}) &= \cos(\Phi_{KA}) \cdot \sin(\Psi_{KA}), \\ \cos(\beta_{KA}) &= \cos(\Phi_{KA}) \cdot \cos(\Psi_{KA}),\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\cos(\gamma_{KA}) &= \sin(\Phi_{KA}), \\ \cos(\alpha_{A1}) &= -\sin(\Phi_{ДН}) \cdot \sin(\Psi_{ДН}), \\ \cos(\beta_{A1}) &= -\sin(\Phi_{ДН}) \cdot \cos(\Psi_{ДН}), \\ \cos(\gamma_{A1}) &= \cos(\Phi_{ДН}),\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{A2}) &= \sin(\Phi_{ДН}) \cdot \sin(\Psi_{ДН}), \\ \cos(\beta_{A2}) &= \sin(\Phi_{ДН}) \cdot \cos(\Psi_{ДН}), \\ \cos(\gamma_{A2}) &= -\cos(\Phi_{ДН}),\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_{A3}) &= \cos(\Psi_{ДН}), \\ \cos(\beta_{A1}) &= -\sin(\Psi_{ДН}), \quad \cos(\gamma_{A4}) = 0,\end{aligned}\quad (5)$$

$$\cos(\alpha_{A4}) = -\cos(\Psi_{ДН}),\quad (6)$$

$$\cos(\beta_{A1}) = \sin(\Psi_{ДН}), \quad \cos(\gamma_{A4}) = 0,\quad (7)$$

$$\Phi_{ДН} = \Phi_{KA} + \Delta\Phi, \quad \Psi_{ДН} = \Psi_{KA} + \Delta\Psi.$$

Разность хода ΔR_{ij} и время распространения ΔT_{ij} лучей между антеннами A_i и A_j , $i, j = 1-4$, $i \neq j$ определяются очевидными выражениями:

$$\Delta R_{ij} = \Delta R_{i0} - \Delta R_{j0},\quad (8)$$

$$\Delta T_{ij} = \Delta R_{ij}/c,\quad (9)$$

где c — скорость света в свободном пространстве.

Сдвиг по фазе между сигналами антенн A_i и A_j на несущей частоте f_n :

$$\Delta\varphi_{ij} = \omega_n \cdot \Delta T_{ij} = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \Delta T_{ij}.\quad (10)$$

Получение суммарных и разностных сигналов с вертикальных и горизонтальных антенн решетки Б-529 в каждом из рабочих диапазонов М1, М2, Д1, Д2, Д4 осуществляется на своей схеме из кольцевых мостов [3, с. 94–95], представляющих из себя свернутый в кольцо коаксиальный кабель длиной $3\lambda/2$, в который с интервалом $\lambda/4$ включены 4 коаксиальных кабельных отвода, как показано на рис. 4. При возбуждении 2-го плеча в обе стороны по кольцу распространяются волны, которые в области плеч 3 и 1 оказываются синфазными, а в области плеча 4 противофазными. Поэтому мощность сигнала делится поровну между плечами 3 и 1, а плечо 4 развязано [3, с. 95].

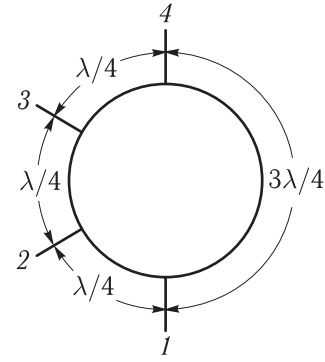


Рис. 4. Кольцевой мост на коаксиальном кабеле

При возбуждении 4-го плеча распространяющиеся в обе стороны по кольцу волны в области плеч 3 и 1 также оказываются синфазными, а в области плеча 2 — противофазными. Поэтому и в этом случае мощность сигнала делится поровну между плечами 3 и 1, а плечо 2 развязано. В случае одновременного возбуждения плеч 2 и 4 синфазными колебаниями волны, приходящие в плечо 3 от плеч 2 и 4, оказываются синфазными и складываются по амплитуде, а волны, приходящие в плечо 1 от плеч 2 и 4, оказываются противофазными и вычитаются по амплитуде.

При одинаковой мощности P_c и амплитуде $\sqrt{2RP_c}$ каждого из возбуждающих плеч 2 и 4 синфазных сигналов на плечо 3 поступят синфазные, а на плечо 1 — противофазные сигналы мощности $P_c/2$ и амплитуды $\sqrt{RP_c}$. Здесь R — сопротивление нагрузки, согласованное с волновым сопротивлением линии. На плече 3 поступившие сигналы сложатся и будут иметь амплитуду $2\sqrt{RP_c}$ и результирующую мощность $2P_c$, а на плече 1 аннигилируют и будут иметь результирующую мощность 0. Таким образом, мощность сигнала, уходящего в плечо 3, будет равна суммарной мощности синфазных сигналов, подводимых к плечам 2 и 4. На этом свойстве кольцевого моста и основано формирование суммарно-разностных сигналов в антенной системе Б-529.

Что касается шумов из возбуждающих плеч 2 и 4, то мощность шума $P_{ш}$ каждого из этих плеч делится поровну между плечами 3 и 1, а поскольку шумы независимы, то в плечах 3 и 1 они складываются по мощности. Таким образом, шумы мощности $P_{ш}$ из плеч 2 и 4 дадут шум одиночной мощности $P_{ш}$ в плечах 3 и 1.

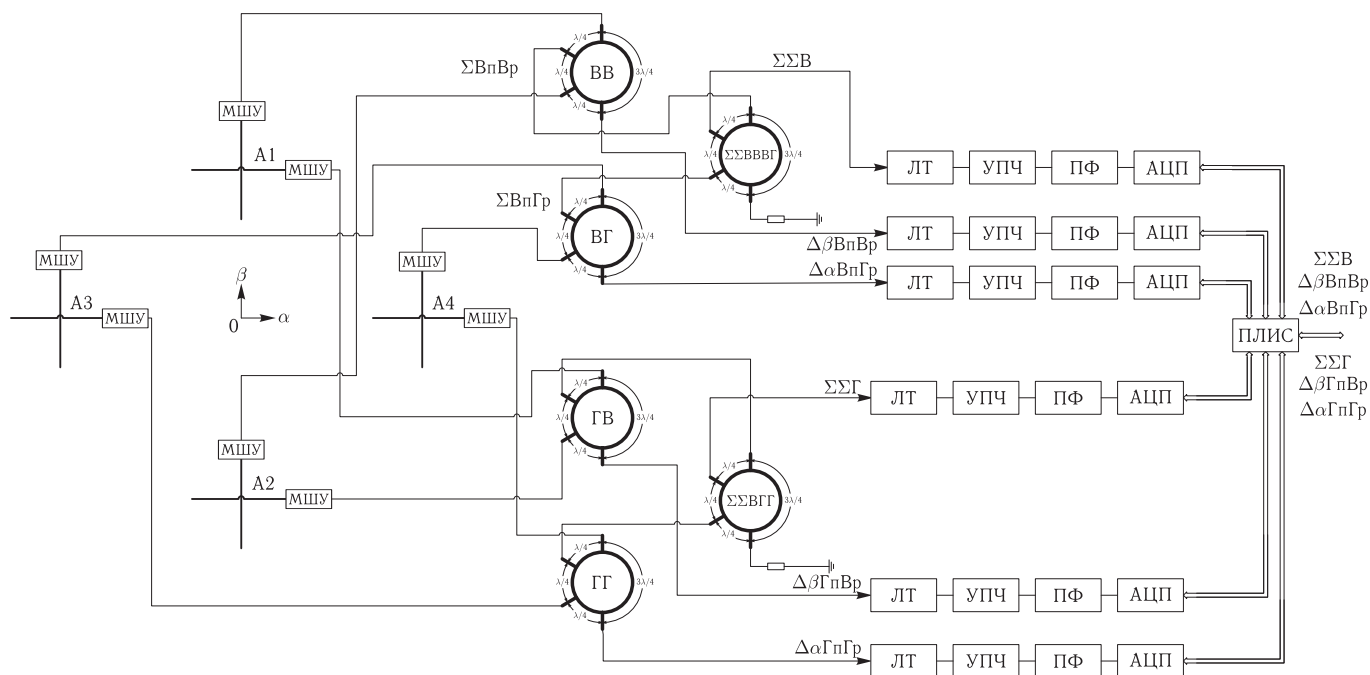


Рис. 5. Схема аналогового формирования и цифрового приема суммарно-разностных сигналов линейной поляризации антенной системы Б-529

В итоге при синфазном сложении сигналов на кольцевом мосте отношение сигнал/шум по мощности удваивается: $P_{сз}/P_{шз} = 2(P_c/P_{ш})$.

На рис. 5 представлена схема аналогового формирования антенной системой Б-529 суммарно-разностных сигналов линейной поляризации отдельно для вертикальной и горизонтальной поляризации. Здесь имеются два этапа сложения сигналов, причем как на первой, так и на второй ступени складываются синфазные сигналы. Поэтому отношение сигнал/шум на каждой ступени удваивается и результирующее отношение сигнал/шум становится равным $4(P_c/P_{ш})$.

Будем считать, что после получения суммарно-разностных сигналов на кольцевых мостах дальнейшая обработка радиосигналов осуществляется на современных цифровых приемниках. Поскольку мощность теплового шума определяется известным выражением

$$P_{ш} = k \cdot t \cdot \Delta F_{МШУ}, \quad (11)$$

где k — постоянная Больцмана, t — шумовая температура первого каскада МШУ, ΔF — полоса частот МШУ, то здесь ключевую роль для отношения

сигнал/шум играет полосовой фильтр (ПФ) после усилителя промежуточной частоты (УПЧ), после которого отношение сигнал/шум по мощности становится равным

$$\left(\frac{P_{сз}}{P_{шз}} \right)_A = 4 \cdot \frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{МШУ}}{\Delta F_{УПЧ}}, \quad (12)$$

где $\Delta F_{УПЧ}$ — полоса частот ПФ после УПЧ. Поскольку при сравнении аналоговых и цифровых методов сложения сигналов антенн Б-529 нас интересуют отношения сигналов, то коэффициент передачи приемного тракта для удобства сравнения может быть принят равным 1.

Теперь рассмотрим процесс сложения сигналов при цифровой обработке, схема которой представлена на рис. 6.

При цифровой обработке имеем 8 независимых каналов приема сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации с четырех антенн Б-529, каждый из которых состоит из линейного высокочастотного тракта (ЛТ), усилителя промежуточной частоты (УПЧ), полосового фильтра (ПФ) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Оцифрованные сигналы поступают на программируемую логическую интегральную схему

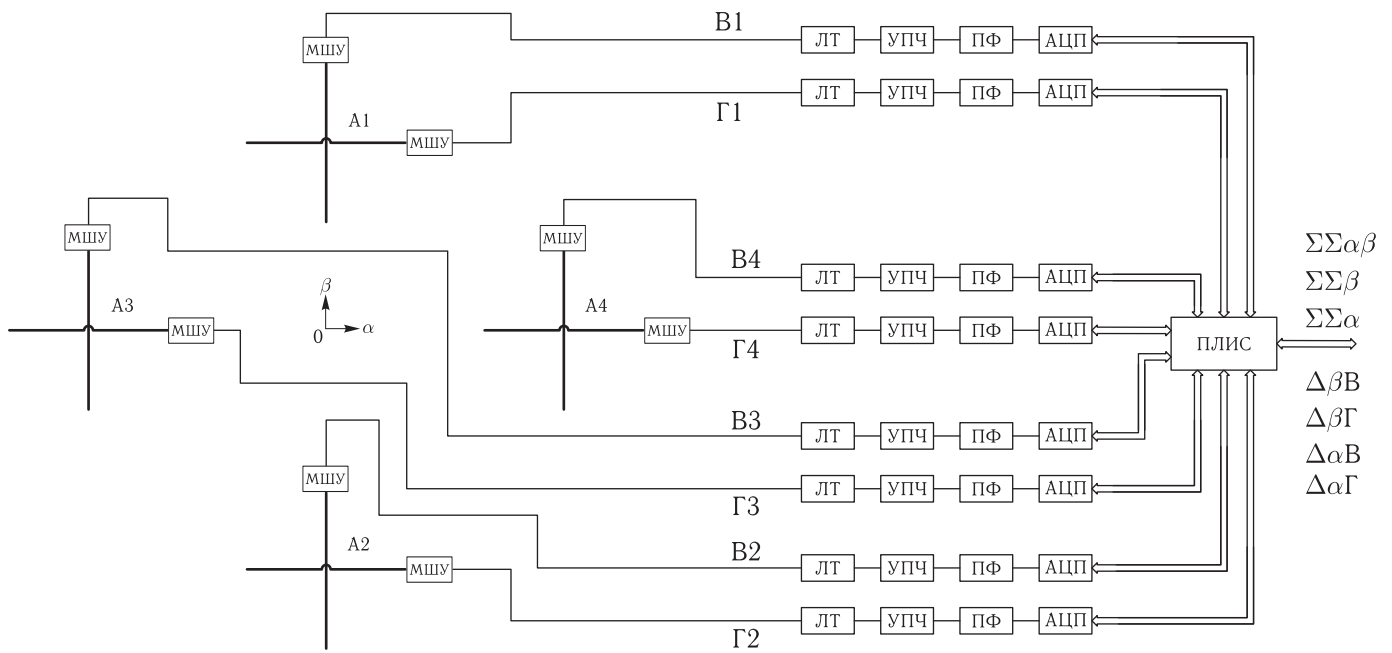


Рис. 6. Структурная схема цифровой обработки радиосигналов РТС-9

(ПЛИС), которая осуществляет их обработку. Сигналы от четырех антенн при точном наведении на объект по-прежнему фазированы путем подбора длины кабеля от МШУ до ЛТ, как и при аналоговом приеме. Кольцевые мосты из схемы исключаются. Их функции по формированию суммарно-разностных сигналов возложены на ПЛИС.

В этих условиях при точном наведении на объект на вход АЦП поступают синфазные сигналы для одинаковой поляризации (вертикальной или горизонтальной). В ПЛИС сигналы одной поляризации складываются по амплитуде. При мощности сигнала P_c и амплитуде $\sqrt{2RP_c}$ амплитуда суммарного сигнала будет равна $4\sqrt{2RP_c}$, а мощность — $16P_c$. Шумы складываются по мощности, поэтому при мощности шума в одном канале на входе МШУ, равной $P_{ш}$, мощность шума после прохождения через полосовой фильтр УПЧ будет равна $P_{ш}(\Delta F_{УПЧ}/\Delta F_{МШУ})$, а после суммирования четырех сигналов $4P_{ш}(\Delta F_{УПЧ}/\Delta F_{МШУ})$. Таким образом, отношение сигнал/шум по мощности для линейной поляризации при цифровом сложении сигналов четырех антенн будет равно

$$\left(\frac{P_{c\Sigma}}{P_{ш\Sigma}} \right)_{Ц} = 4 \cdot \frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{МШУ}}{\Delta F_{УПЧ}}. \quad (13)$$

Из (2) и (3) видим, что при абсолютно точном наведении синфазной антенной решетки Б-529 на источник радиосигнала отношения сигнал/шум для цифрового и аналогового метода формирования суммарного сигнала четырех антенн Б-529 одинаковы:

$$\frac{\left(\frac{P_{c\Sigma}}{P_{ш\Sigma}} \right)_{Ц}}{\left(\frac{P_{c\Sigma}}{P_{ш\Sigma}} \right)_{А}} = 1. \quad (14)$$

Поскольку суммарная площадь раскрытия четырех 6-метровых параболических антенн системы Б-529 равна площади раскрытия 12-метровой антенны ТНА-57, то дальность действия по суммарному информационному сигналу антенной системы Б-527 при надлежащем цифровом фазировании должна быть соизмерима с дальностью действия по информационному каналу антенны ТНА-57.

Теперь сравним характеристики аналогового и цифрового автосопровождения антенной системы Б-529. Здесь принципиально необходимо рассмотреть случай неточного наведения антенной решетки на источник радиосигнала.

Пусть мощность сигнала от одиночной антенны при точном наведении антенной системы Б-529 на КА равна P_c , тогда мощность сигнала

по мощности для разностных сигналов антенн A_i и A_j при отклонении от направления на КА:

$$\frac{P_{c\Delta ij}}{P_{ш\Delta ij}} = \frac{P_c}{P_{ш}} \cdot (F(\Theta))^2 (1 - \cos \Delta\varphi_{ij}). \quad (25)$$

После ПФ УПЧ отношение сигнал/шум по мощности для разностных сигналов антенн A_i и A_j при отклонении от направления на КА становится равным:

$$\left(\frac{P_{c\Delta ij}}{P_{ш\Delta ij}} \right)_{\text{ПФ УПЧ}} = \frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{мшУ}}}{\Delta F_{\text{УПЧ}}} \times (F(\Theta))^2 \cdot (1 - \cos \Delta\varphi_{ij}). \quad (26)$$

Отсюда нормированные значения отношения сигнал/шум разностного сигнала относительно отношения сигнал/шум для сигнала одиночной антенны после ПФ УПЧ при аналоговом вычитании:

$$\left(\frac{P_{c\Delta ij}}{P_{ш\Delta ij}} \right)_{\text{А ПФ УПЧ}} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{мшУ}}}{\Delta F_{\text{УПЧ}}} \right) = (F(\Theta))^2 (1 - \cos \Delta\varphi_{ij}). \quad (27)$$

При цифровом формировании разностного сигнала отношение сигнал/шум, равное $P_c/P_{ш}$, сохраняется до полосового фильтра УПЧ, после которого становится равным $(P_c/P_{ш})(\Delta F_{\text{мшУ}}/\Delta F_{\text{УПЧ}})$. При вычитании в цифровой форме шумы по мощности складываются, но и мощность сигнала не делится пополам, как на кольцевом мосте, поэтому вместо (15) мы имеем

$$U_c = \sqrt{2RP_c}. \quad (28)$$

Отсюда

$$U_c^2 = 2RP_c. \quad (29)$$

Амплитуда сигнала одиночной антенны при отклонении синфазной антенной решетки на угол Θ будет равна

$$U_{c\Theta} = U_c \cdot F(\Theta). \quad (30)$$

По аналогии с (16), (23) и (24) с учетом (28)–(30) при цифровой обработке до ПФ получаем вдвое большую мощность разностного сигнала:

$$P_{c\Delta ij\text{Ц}} = 2P_c \cdot (F(\Theta))^2 (1 - \cos \Delta\varphi_{ij}). \quad (31)$$

Однако и шум будет также двойной мощности. В результате получаем те же нормированные значения

отношения сигнал/шум разностного сигнала относительно отношения сигнал/шум для сигнала одиночной антенны после ПФ УПЧ, что и при аналоговом методе формирования разностных сигналов:

$$\left(\frac{P_{c\Delta ij}}{P_{ш\Delta ij}} \right)_{\text{Ц ПФ УПЧ}} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{мшУ}}}{\Delta F_{\text{УПЧ}}} \right) = (F(\Theta))^2 (1 - \cos \Delta\varphi_{ij}). \quad (32)$$

Таким образом, прямой перенос метода формирования разностного сигнала с аналоговой на цифровую обработку не улучшает отношение сигнал/шум в гипотетическом случае идеальной аналоговой обработки. Однако цифровая обработка, помимо реализации с идеальными характеристиками методов, используемых при аналоговом фазировании, открывает новые возможности повышения отношения сигнал/шум при формировании разностного сигнала.

Предлагается применить формирование разностных сигналов наведения по суммарному сигналу от всех четырех антенн системы Б-529. Для этого предлагается цифровыми методами «качнуть» луч антенной системы Б-524 вверх-вниз и вправо-влево и вычислить разностные сигналы суммарного луча решетки между соответствующими позициями отклонения, то есть работать по равнотензорной зоне диаграммы направленности решетки. Схема предлагаемого технического решения приведена на рис. 8.

На этом рисунке представлена линейка средств только для одной из четырех антенн Б-529. Схемы обработки радиосигналов остальных антенн аналогичны. Здесь в дополнение к АЦП для формирования сигнала вертикальной или горизонтальной поляризации без сдвига по фазе добавлены два АЦП с целью формирования сигнала с опережением и с отставанием по фазе на некоторый угол μ , о выборе которого скажем позже. Теперь же отметим, что при отклонении от объекта, помимо возникновения разностных сигналов, на основе которых работает система автосопровождения, происходит «просадка» суммарного сигнала. Векторные диаграммы формирования суммарных сигналов вертикального и горизонтального рядов антенной системы Б-529 при наличии отклонения от цели для цифровой обработки представлены на рис. 9.

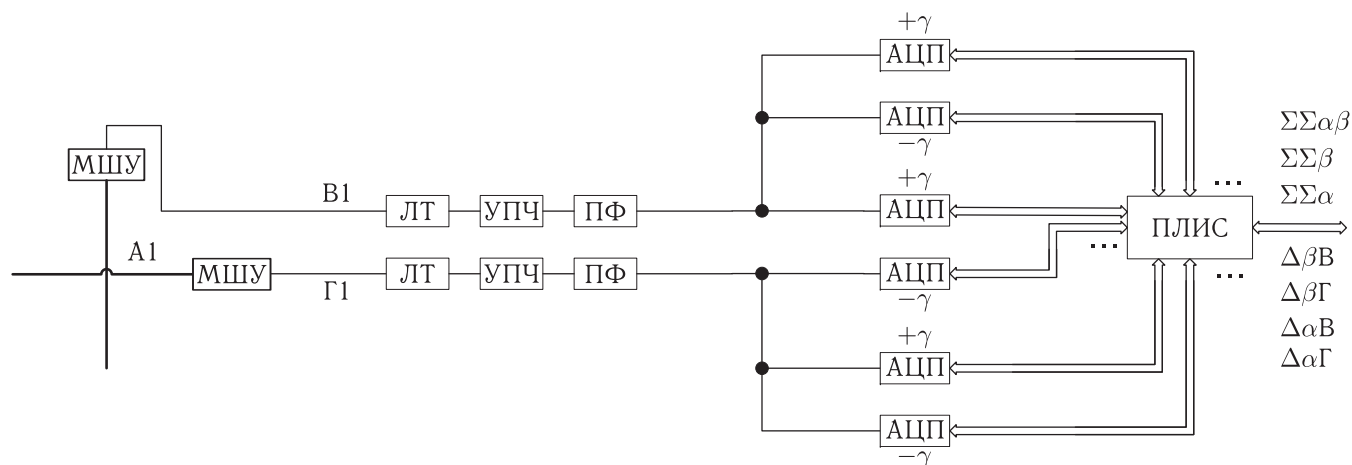


Рис. 8. Структурная схема цифровой обработки радиосигналов одной из четырех антенн РТС-9 для автосопровождения по разности суммарных сигналов

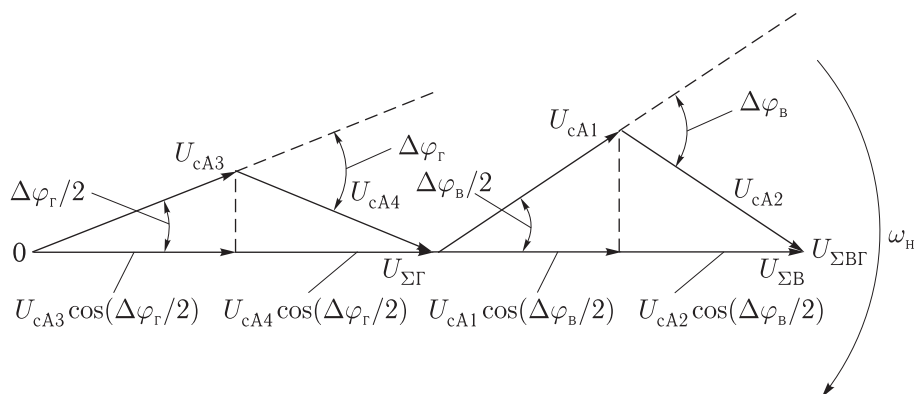


Рис. 9. Векторная диаграмма формирования суммарного сигнала вертикальных и горизонтальных антенн при цифровой обработке

На векторной диаграмме рис. 9 учтено, что в соответствии с выражениями (1)–(10) сдвиги фаз сигналов антенн А1 и А2 относительно фазового центра синфазной решетки Б-529 являются одинаковыми по величине и противоположными по знаку. То же самое относится к сдвигам фаз относительно фазового центра решетки сигналов антенн А3 и А4. Это означает, что попарные суммы сигналов антенн А1 и А2 и антенн А3 и А4 имеют одинаковую фазу, равную фазе суммарного сигнала от всех четырех антенн при любых отклонениях оси диаграммы направленности от направления на КА.

Далее, в соответствии с рис. 9 амплитуда суммарного сигнала при цифровой обработке определяется выражением:

$$U_{\Sigma ВГ} = 2U_{\text{с} \Theta} \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{В}}}{2} \right) + \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{Г}}}{2} \right) \right]. \quad (33)$$

Мощность суммарного сигнала вертикальной и горизонтальной линеек антенн:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma ВГ} &= \frac{U_{\Sigma ВГ}^2}{2R} = \\ &= \frac{\left[2U_{\text{с} \Theta} \left\{ \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{В}}}{2} \right) + \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{Г}}}{2} \right) \right\} \right]^2}{2R} = \\ &= \frac{4 \cdot 2R \cdot P_c [F(\Theta)]^2 \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{В}}}{2} \right) + \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{Г}}}{2} \right) \right]^2}{2R}, \\ P_{\Sigma ВГ} &= 4P_c [F(\Theta)]^2 \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{В}}}{2} \right) + \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{Г}}}{2} \right) \right]^2. \end{aligned} \quad (34)$$

Поскольку шумы в четырех линейных трактах при цифровой обработке независимы, то они скла-

В соответствии с рис. 10:

$$U_{\Sigma B1} = U_{c\Theta} \left[2 \cos \left(\frac{\Delta\varphi_{\Gamma}}{2} \right) + \cos \left(-\frac{\Delta\varphi_B}{2} + \mu \right) + \cos \left(+\frac{\Delta\varphi_B}{2} - \mu \right) \right], \quad (38)$$

$$U_{\Sigma B2} = U_{c\Theta} \left[2 \cos \left(\frac{\Delta\varphi_{\Gamma}}{2} \right) + \cos \left(-\frac{\Delta\varphi_B}{2} - \mu \right) + \cos \left(+\frac{\Delta\varphi_B}{2} + \mu \right) \right], \quad (39)$$

$$U_{\Delta B} = U_{\Sigma B1} - U_{\Sigma B2} = 2U_{c\Theta} \left[\cos \left(\frac{\Delta\varphi_B}{2} - \mu \right) - \cos \left(\frac{\Delta\varphi_B}{2} + \mu \right) \right]. \quad (40)$$

Как видим, разностный сигнал наведения по вертикали зависит только от суммарного сигнала двух антенн вертикального ряда. Поэтому, чтобы не собирать лишние шумы из ортогонального ряда антенн, при формировании разностного сигнала автосопровождения по вертикали следует использовать суммарный сигнал только от вертикальных антенн, а при автосопровождении по горизонтали — суммарный сигнал только от горизонтальных антенн.

На рис. 11 показана процедура формирования разностного сигнала наведения по вертикали при отклонении антенной системы в сторону увеличения угла места. Разностный сигнал и в этом случае

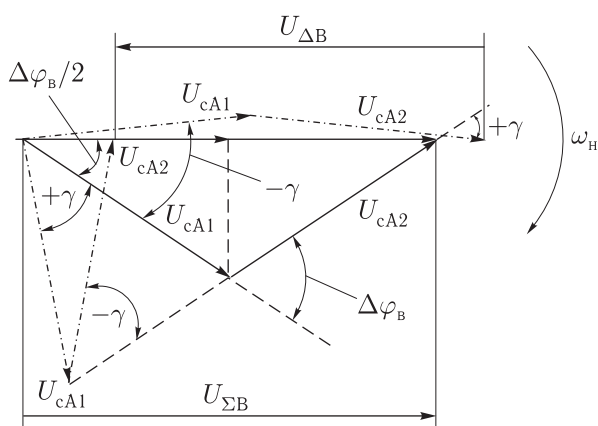


Рис. 11. Формирование разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн при наличии отклонения по вертикали в сторону увеличения угла места

определяется выражением (40), но меняет знак на противоположный, поскольку на противоположный меняет знак угол отклонения $\Delta\Phi$ и, следовательно, меняет знак сдвиг по фазе $\Delta\varphi_B$.

На рис. 12 показано, что в случае отсутствия отклонения антенной системы по вертикали разностный сигнал будет равен нулю при любом «качающем» угле μ .

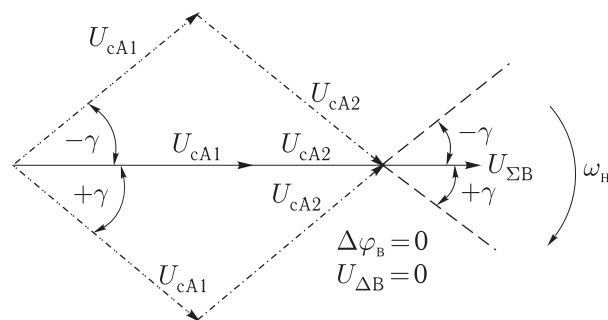


Рис. 12. Формирование нулевого разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн при отсутствии отклонения по вертикали — равносигнальная зона

Теперь оценим отношение сигнал/шум по мощности для разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн по методу равносигнальной зоны.

Из (40) получаем выражение для мощности разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн:

$$P_{c\Delta B} = 4P_c [F(\Theta)]^2 \times \left[\cos \left(\frac{\Delta\varphi_{12}}{2} - \mu \right) - \cos \left(\frac{\Delta\varphi_{12}}{2} + \mu \right) \right]^2. \quad (41)$$

Поскольку шум от МШУ каждой «вертикальной» антенны дважды независимо участвует в процедуре формирования разностного сигнала (при сложении и при вычитании), то суммарная мощность шума после ПФ УПЧ будет равна:

$$P_{ш\Delta B} = 4P_{ш} \cdot \frac{\Delta F_{УПЧ}}{\Delta F_{МШУ}}. \quad (42)$$

Из (41) и (42) получаем искомое выражение для отношения сигнал/шум по мощности при формировании разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн по методу

равносигнальной зоны:

$$\frac{P_{с\Delta B}}{P_{ш\Delta B}} = \frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{мш\psi}}{\Delta F_{уПЧ}} \times \\ \times [F(\Theta)]^2 \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} - \mu \right) - \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} + \mu \right) \right]^2. \quad (43)$$

Отсюда нормированное значение отношения сигнал/шум разностного сигнала по суммарному сигналу вертикального ряда антенн по методу равносигнальной зоны относительно отношения сигнал/шум входного сигнала одиночной антенны после ПФ УПЧ равно:

$$\left(\frac{P_{с\Delta B}}{P_{ш\Delta B}} \right) / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{мш\psi}}{\Delta F_{уПЧ}} \right) = (F(\Theta))^2 \times \\ \times \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} - \mu \right) - \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} + \mu \right) \right]^2. \quad (44)$$

Разделив (44) на (27), получим отношение сигнал/шум по мощности для разностных сигналов автосопровождения при равносигнальной цифровой и аналоговой обработках:

$$\left(\frac{P_{\Delta B}}{P_{ш\Delta B}} \right)_{Ц} / \left(\frac{P_{\Delta B}}{P_{ш\Delta B}} \right)_{А} = \\ = \frac{\left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} - \mu \right) - \cos \left(\frac{\Delta \varphi_{12}}{2} + \mu \right) \right]^2}{1 - \cos \Delta \varphi_{12}} = \\ = 2 \cdot (\sin \mu)^2. \quad (45)$$

Очевидно, это отношение достигает максимума = 2 при $\mu = \pi/2$, когда $\sin \mu = 1$.

Таким образом, выбрав угол отклонения $\mu = \pi/2$, получим повышение отношения сигнал/шум по мощности в 2 раза при использовании равносигнального цифрового метода по сравнению с исходным аналоговым методом получения разностного сигнала автосопровождения на кольцевых мостах. Это верно при условии использования при формировании разностного сигнала двух антенн по вертикали и двух антенн по горизонтали. Платой за это является утроение необходимого количества АЦП (24 вместо 8).

Следует отметить, что структура антенной системы Б-529 позволяет повернуть оси наведения на 45° и использовать способ наведения с применением формирования суммарно-разностных сигналов по схеме (A1 + A3) – (A4 + A2) при отклонениях по оси $+45^\circ$ и по схеме (A1 + A4) – (A3 + A2) при отклонениях по оси -45° (см. рис. 2).

Прежде чем рассматривать этот «косой» способ наведения, отметим, что в соответствии с (1)–(10) в силу симметрии антенной решетки Б-529 имеет место равенство фазовых сдвигов:

$$\Delta \varphi_{13} = \Delta \varphi_{42} \quad \text{и} \quad \Delta \varphi_{14} = \Delta \varphi_{32}. \quad (46)$$

Используя ту же методику, что и ранее, нетрудно показать, что нормированные значения отношения сигнал/шум для суммарно-разностного сигнала (A1 + A3) – (A4 + A2) при аналоговой обработке относительно отношения сигнал/шум для сигнала одиночной антенны после ПФ УПЧ при аналоговом вычитании равны:

$$\left(\frac{P_{с\Delta \varphi_{13-42}}}{P_{ш\Delta \varphi_{13-42}}} \right)_{А \text{ ПФ УПЧ}} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{мш\psi}}{\Delta F_{уПЧ}} \right) = \\ = 2 (F(\Theta))^2 \left[\cos \left(\frac{\Delta \varphi_{13}}{2} \right) \right]^2 (1 - \cos \Delta \varphi_{14}). \quad (47)$$

При цифровой обработке после ПФ УПЧ то же самое нормированное отношение сигнал/шум:

$$\left(\frac{P_{с\Delta \varphi_{13-42}}}{P_{ш\Delta \varphi_{13-42}}} \right)_{Ц \text{ ПФ УПЧ}} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{мш\psi}}{\Delta F_{уПЧ}} \right) = \\ = \left(\frac{P_{с\Delta \varphi_{13-42}}}{P_{ш\Delta \varphi_{13-42}}} \right)_{А \text{ ПФ УПЧ}} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \cdot \frac{\Delta F_{мш\psi}}{\Delta F_{уПЧ}} \right). \quad (48)$$

То есть цифровая обработка радиосигналов позволяет осуществить идеальное наведение синфазной антенной решеткой.

Интересно сопоставить отношение сигнал/шум (47) при наведении по суммарно-разностному сигналу от всех четырех антенн с отношением сигнал/шум (44) при наведении по равносигнальному

методу для двух антенн при «качающем» угле $\mu = \pi/2$:

$$\frac{4(F(\Theta))^2 \left[\sin\left(\frac{\Delta\varphi_{12}}{2}\right) \right]^2}{2(F(\Theta))^2 \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{13}}{2}\right) \right]^2 \cdot 2 \cdot \left[\sin\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2}\right) \right]^2} = \frac{\left[\sin\left(\frac{\Delta\varphi_{12}}{2}\right) \right]^2}{\left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{13}}{2}\right) \right]^2 \left[\sin\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2}\right) \right]^2}. \quad (49)$$

Числитель достигает максимума 1 при $\Delta\varphi_{12} = \pm\pi$. Знаменатель достигает максимума 1 при $\Delta\varphi_{13} = 0$ или 2π и $\Delta\varphi_{14} = \pm\pi$, то есть при отсутствии отклонения вдоль антенн А1–А3. Поскольку значение сигнал/шум равносигнального метода для двух антенн не зависит от бокового отклонения диаграммы, а значение сигнал/шум при наведении по суммарно-разностному сигналу от всех четырех антенн уменьшается при боковом отклонении диаграммы, то при одинаковых угловых отклонениях равносигнальный метод для двух антенн всегда не хуже метода наведения по суммарно-разностному сигналу от всех четырех антенн по показателю сигнал/шум.

Более того, возможна модификация равносигнального метода для всех четырех антенн, которая даст вдвое большее отношение сигнал/шум, чем метод наведения по суммарно-разностному сигналу от всех четырех антенн. Сущность модифицированного равносигнального метода состоит в том, чтобы «качнуть» диаграмму направленности решетки на некоторый угол ν под углом $\pm 45^\circ$ в обе стороны и определить разностный сигнал.

Теми же методами можно показать, что нормированное значение отношения сигнал/шум разностного сигнала от четырех антенн по методу равносигнальной зоны после ПФ УПЧ определяется выражением:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_{\Sigma 1234 \Delta\varphi_{14}}}{P_{\Pi 1234 \Delta\varphi_{14}}} \right) / \left(\frac{P_c}{P_{\Pi}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{МШУ}}}{\Delta F_{\text{УПЧ}}} \right) = \\ & = 2 \cdot (F(\Theta))^2 \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{13}}{2}\right) \right]^2 \times \\ & \times \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2} + \nu\right) - \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2} - \nu\right) \right]^2. \quad (50) \end{aligned}$$

Теперь сравним нормированные отношения сигнал/шум для разностного сигнала $(A1 + A3) - (A4 + A2)$ и разностного сигнала от четырех антенн по методу равносигнальной зоны, для чего разделим (50) на (47):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P_{\Sigma 1234 \Delta\varphi_{14}}}{P_{\Pi 1234 \Delta\varphi_{14}}} \right) / \left(\frac{P_{\Sigma \Delta\varphi_{13-42}}}{P_{\Pi \Delta\varphi_{13-42}}} \right) = \\ & = 2 \cdot (F(\Theta))^2 \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{13}}{2}\right) \right]^2 \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2} + \nu\right) - \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{14}}{2} - \nu\right) \right]^2 / \left[2(F(\Theta))^2 \left[\cos\left(\frac{\Delta\varphi_{13}}{2}\right) \right]^2 \times \right. \\ & \quad \left. \times (1 - \cos \Delta\varphi_{14}) \right] = 2 \cdot (\sin \nu)^2. \quad (51) \end{aligned}$$

Очевидно, это отношение достигает максимума $= 2$ при $\nu = \pi/2$, когда $\sin \nu = 1$. Таким образом, выбрав угол отклонения $\nu = \pi/2$, получим повышение отношения сигнал/шум по мощности в 2 раза при использовании равносигнального цифрового метода по сравнению с исходным аналоговым методом получения разностного сигнала автосопровождения на кольцевых мостах.

Полученные результаты иллюстрируются графиками на рис. 13–21, где представлены зависимости сигнал/шум по мощности для суммарного и разностных сигналов при аналоговой и цифровой обработках для несущей частоты 150 МГц в различных сечениях диаграммы направленности.

На рис. 13–16 представлены графики сигнал/шум в зависимости от отклонений по азимуту и углу места, из которых видно влияние на графики отклонения по азимуту угла места цели. При углах места цели, близких к зениту, управление наведением антенны по азимуту теряется для всех рассмотренных методов наведения. Этого не происходит при наведении по отклонениям во взаимно перпендикулярных направлениях под углом 45° , как показано на рис. 17–20. Как видим из рис. 19–20, управление наведением по разностным сигналам во взаимно перпендикулярных направлениях под углом 45° не теряется даже в зените, причем сигнал/шум разностного сигнала от четырех антенн по методу равносигнальной зоны после ПФ УПЧ вдвое выше, чем сигнал/шум разностных сигналов пар антенн под углом 45° , то есть сигналов $(A1 + A3) - (A4 + A2)$ и $(A1 + A4) - (A3 + A2)$.

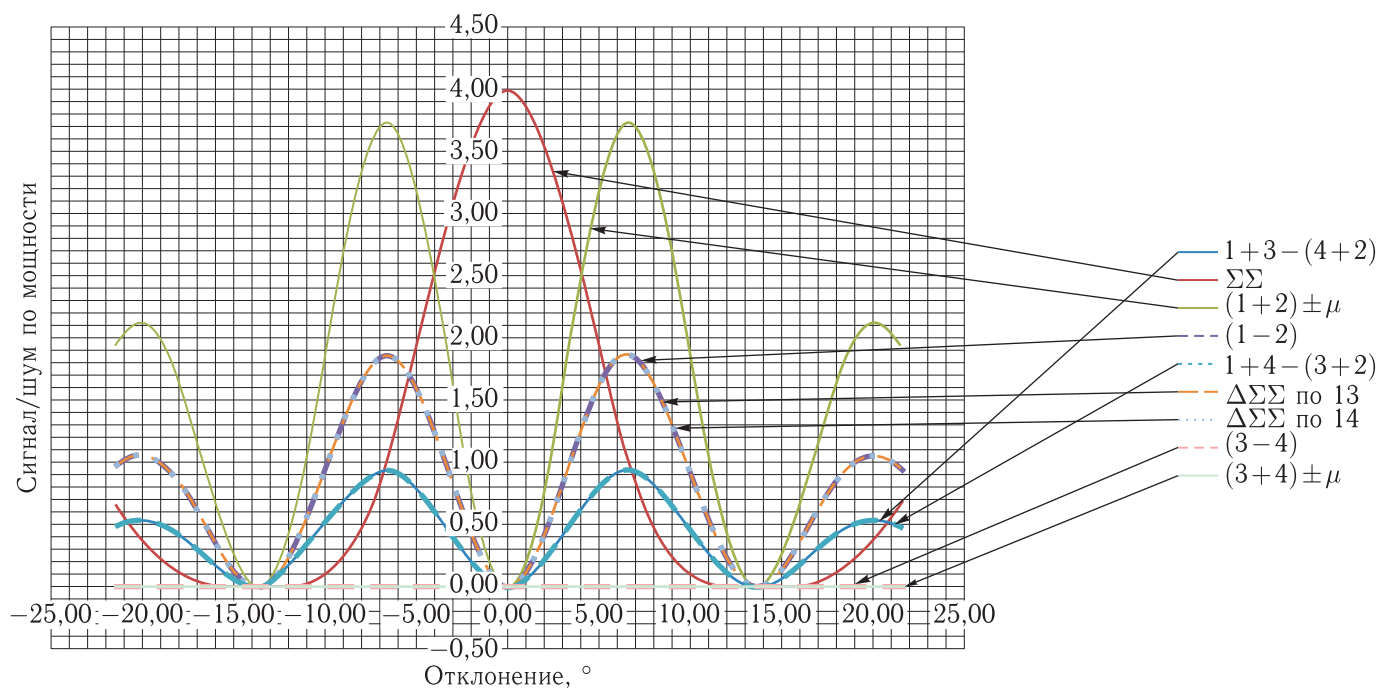


Рис. 13. Отклонение по углу места. От угла места и азимута не зависит

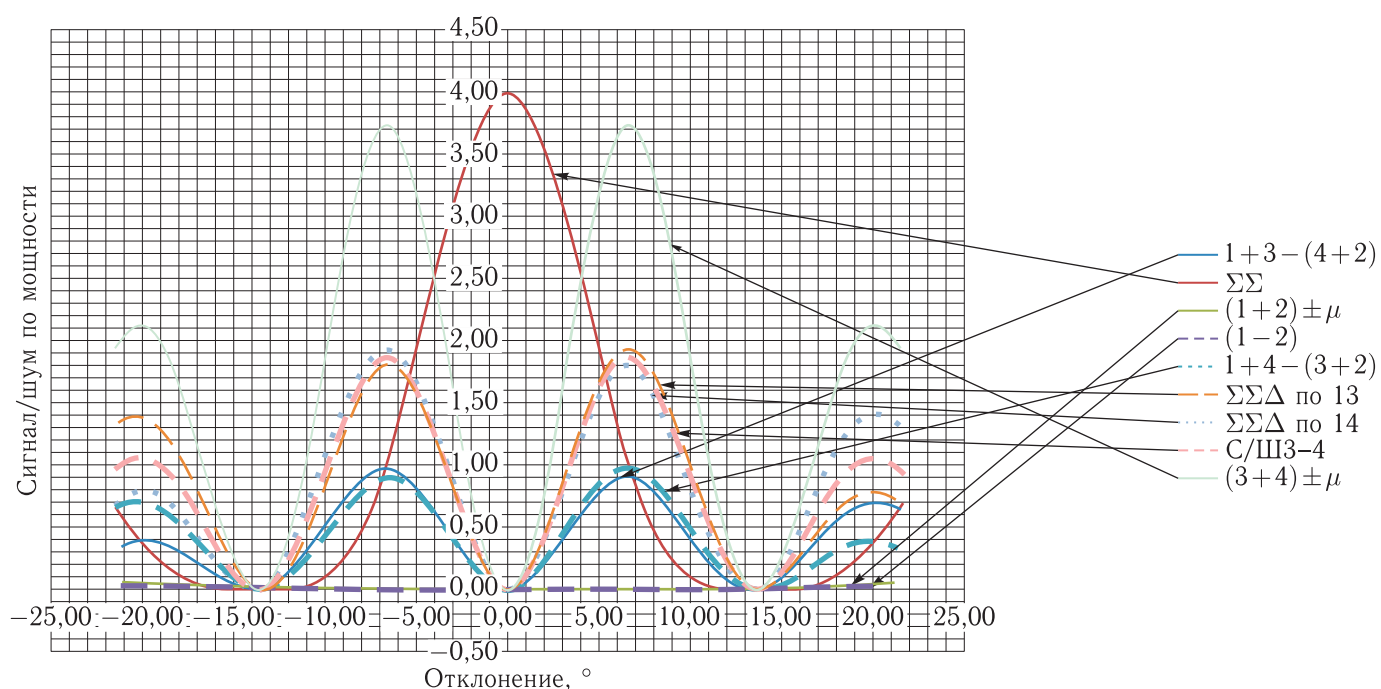


Рис. 14. Отклонение по азимуту. Угол места 10°

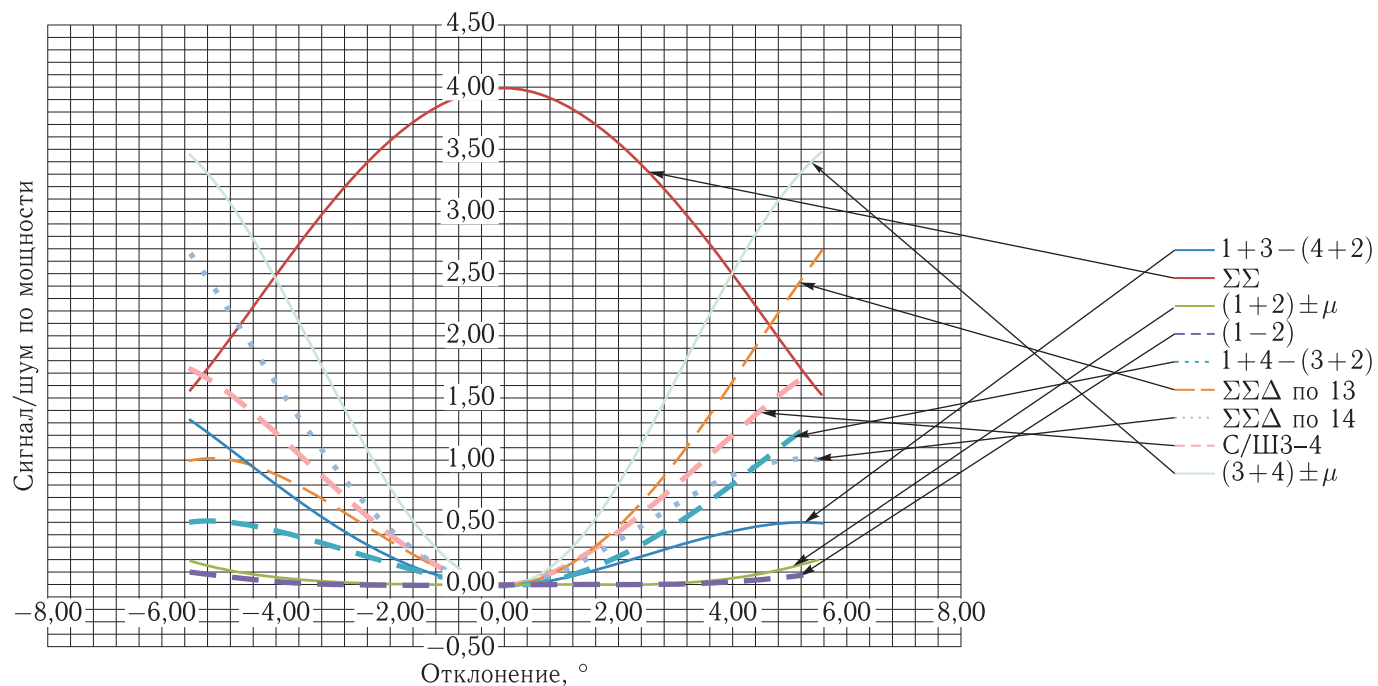


Рис. 15. Отклонение по азимуту. Угол места 75°

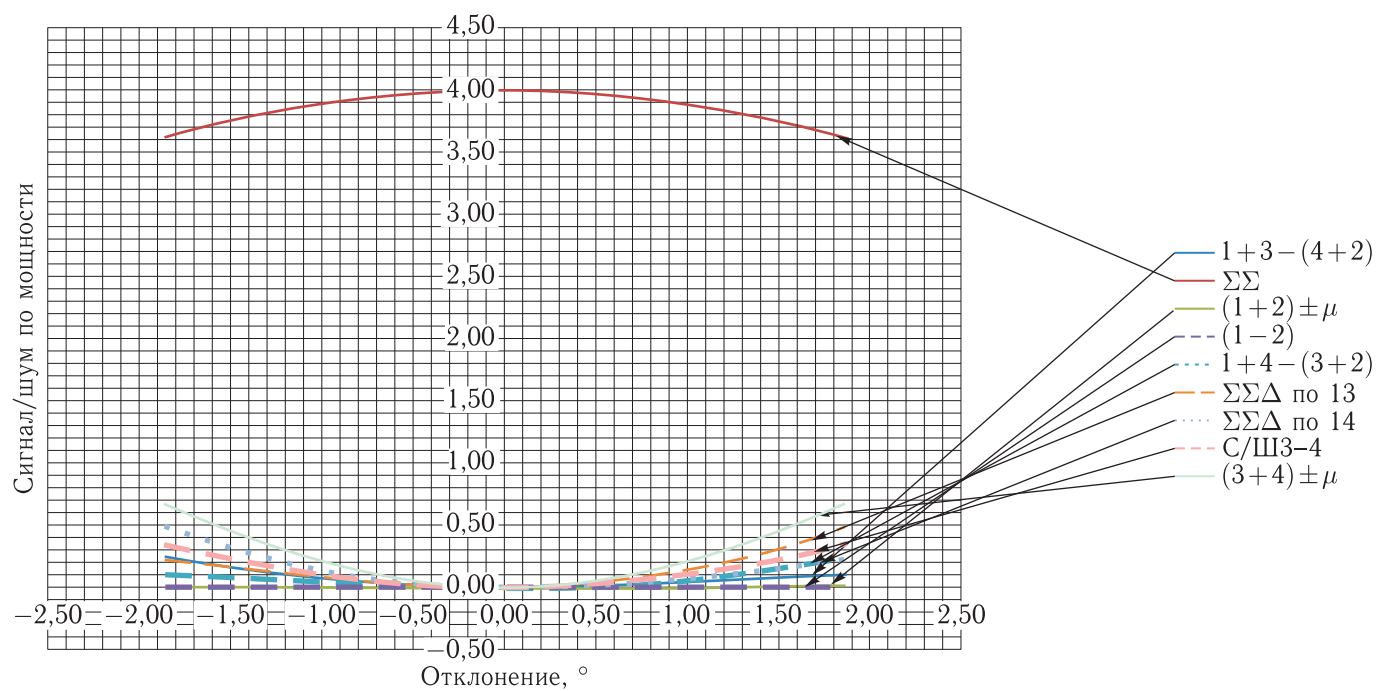
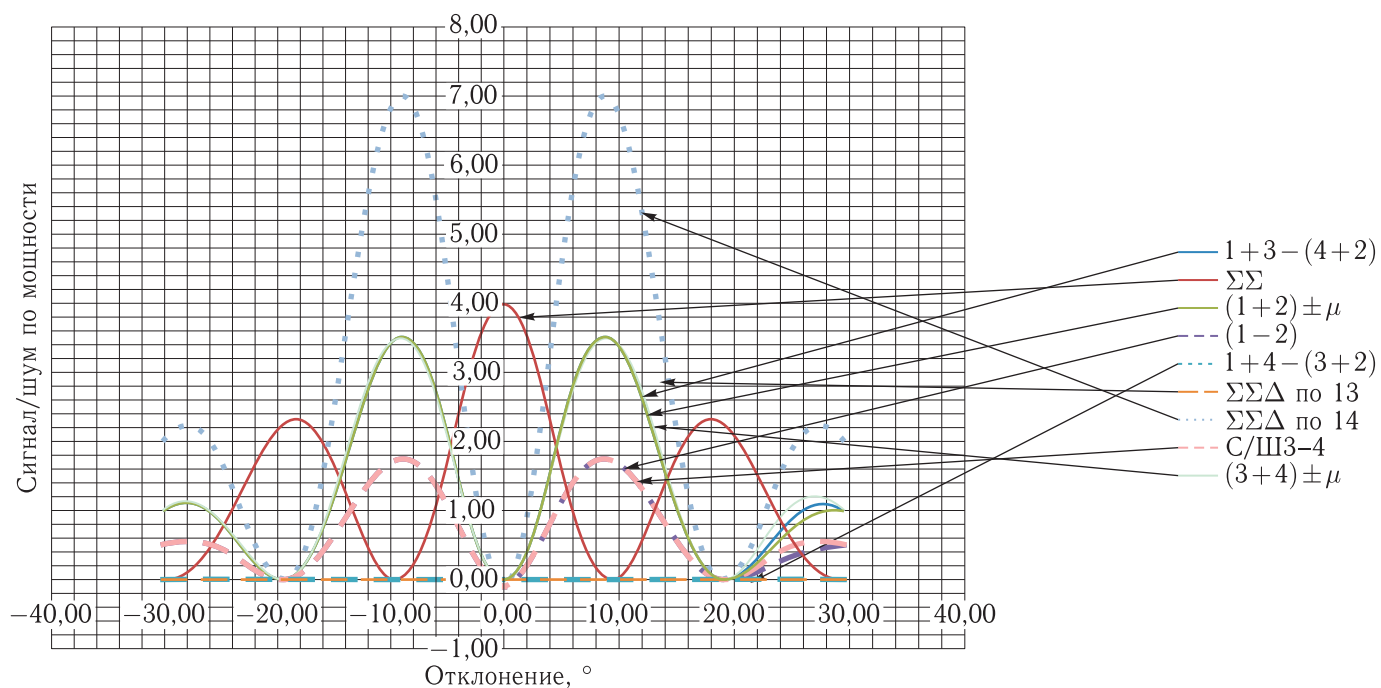
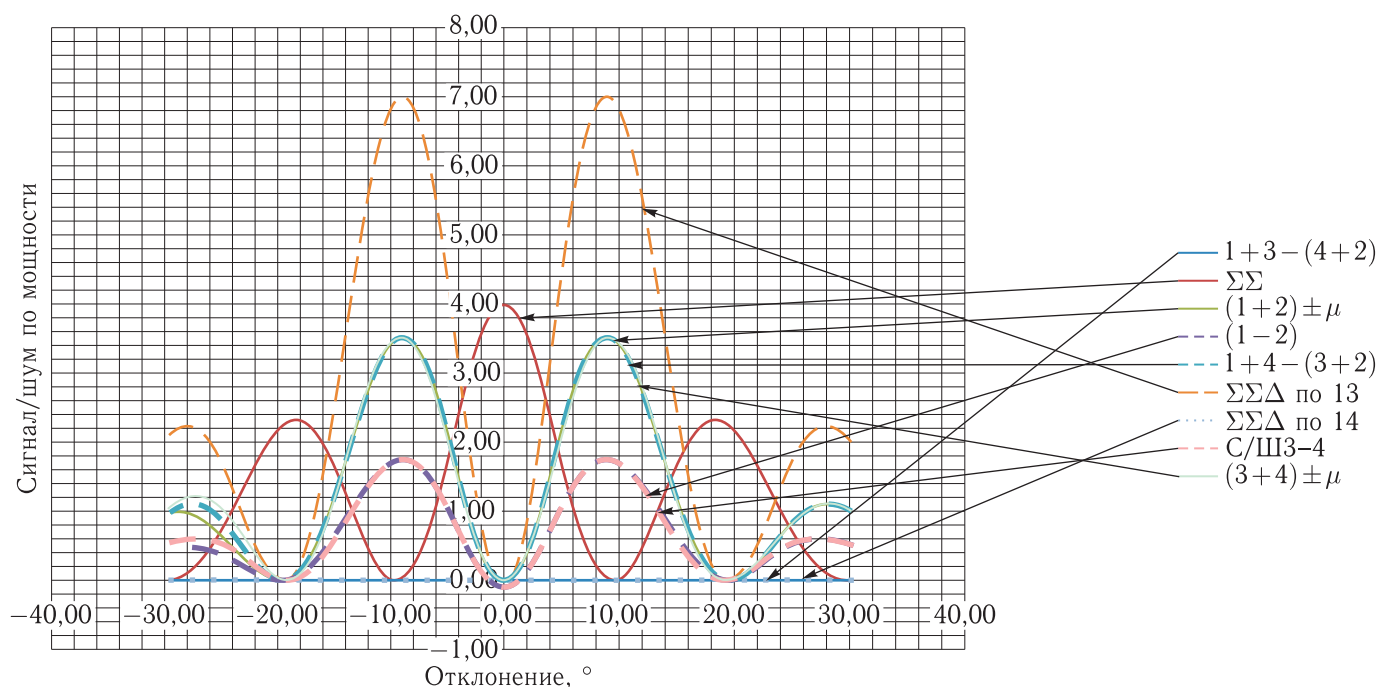


Рис. 16. Отклонение по азимуту. Угол места 85°

Рис. 17. Отклонение по направлению антенн А1–А4. Угол места 10° . От азимута не зависитРис. 18. Отклонение по направлению антенн А1–А3. Угол места 10°

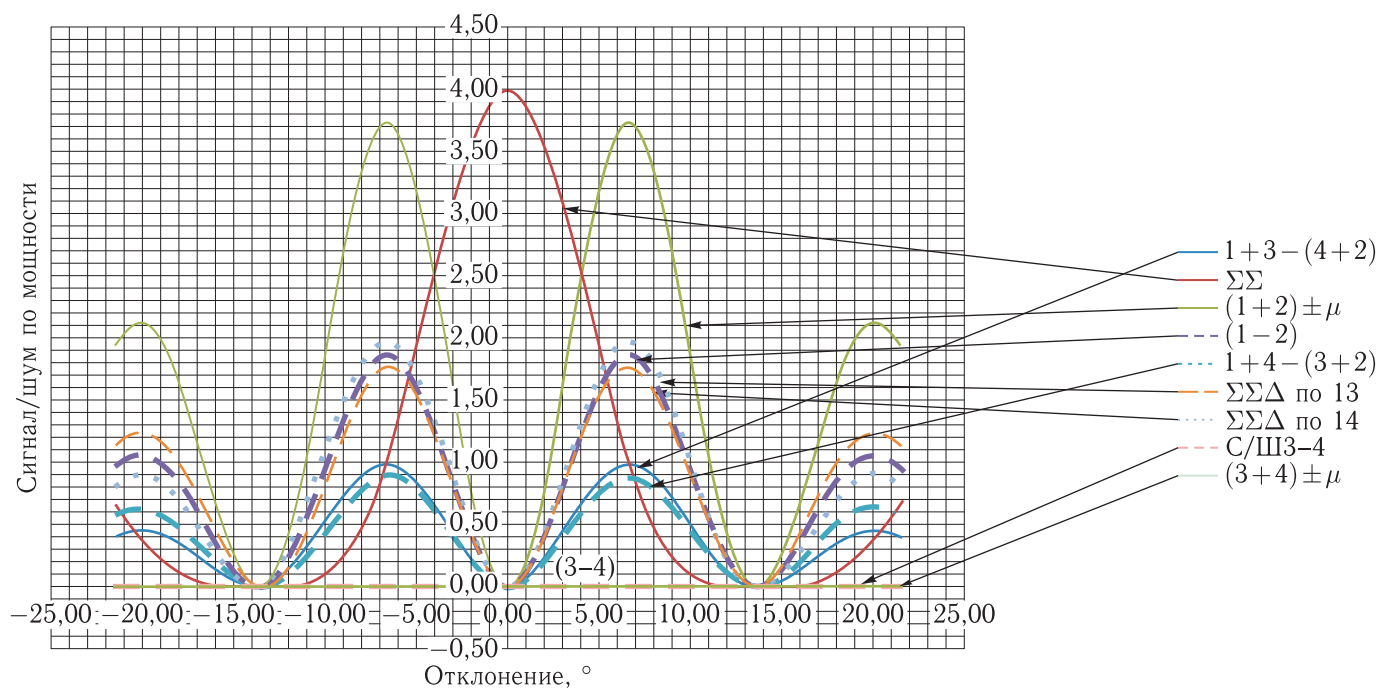


Рис. 19. Отклонение по направлению антенн А1–А4. Угол места 89°

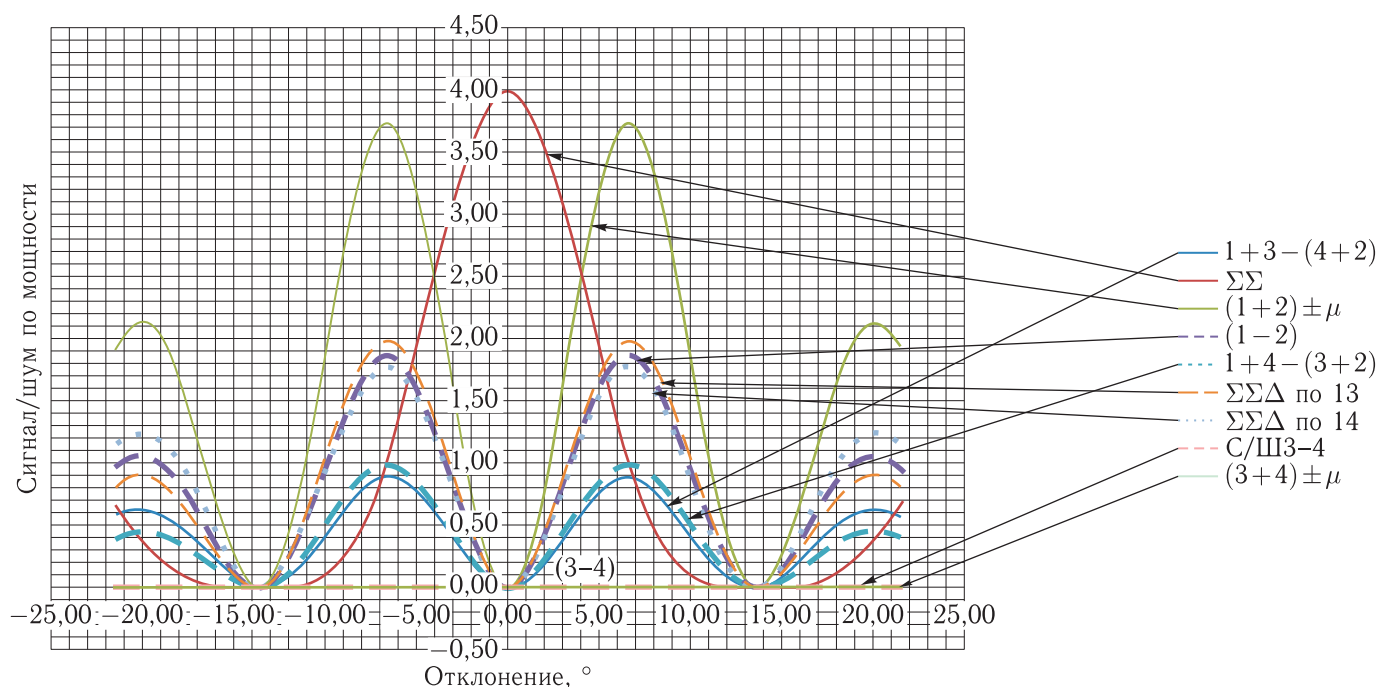


Рис. 20. Отклонение по направлению антенн А1–А3. Угол места 89°

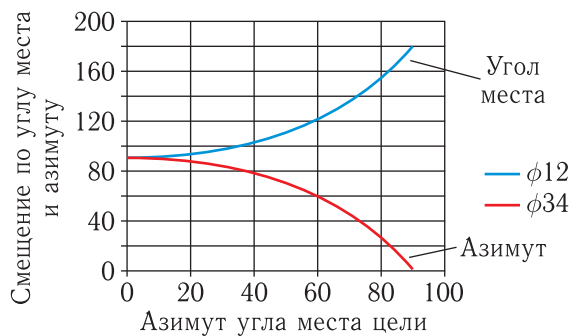


Рис. 21. Отклонения на АЦП по азимуту и углу места при качании диаграммы на $\pm 90^\circ$ в направлениях под 45°

Платой за это является усложнение обработки и управления углами вносимых фазовых сдвигов в процесс аналого-цифрового преобразования, так как сдвиг по фазе на 90° при качании суммарного луча в направлениях под 45° определяется фазовыми сдвигами по азимуту и углу места, а эти фазовые сдвиги, в свою очередь, зависят от угла места цели (см. рис. 21).

Выводы

1. Для суммарного сигнала передачи информации от четырех антенн системы Б-529 цифровая обработка дает то же отношение сигнал/шум по мощности, что и идеальная аналоговая обработка,

то есть цифровая обработка радиосигналов позволяет осуществить идеальное наведение синфазной антенной решетки.

2. Для разностного сигнала автосопровождения при надлежащем использовании метода равносигнальной зоны цифровая обработка может дать выигрыш по отношению сигнал/шум по мощности в 2 раза по сравнению с аналоговым методом формирования разностного сигнала автосопровождения в антенной системе Б-529 в идеальных условиях, что позволяет увеличить дальность действия радиолинии «Борт»–«Земля» по наведению антенной системы Б-529 на КА в $\sqrt{2}$ раза.

Список литературы

1. Гришмановский В. А., Степанов В. С. Расчет дальности, времени видимости КА и энергетических характеристик радиолиний для передачи телеметрической информации. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по курсу «Командно-измерительный комплекс управления». ВИКИ им. А. Ф. Можайского. 1985 г.
2. Энергетические характеристики космических радиолиний / Под ред. О. А. Зенкевича. М.: Сов. радио, 1972.
3. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.