

## Особенности формирования диаграммы направленности антенны БСА ФИАН с использованием матриц Батлера

© В. В. Орешко

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, ПРАО АКЦ ФИАН, г. Пушино, Россия

### Реферат

В работе рассмотрено использование матриц Батлера  $16 \times 16$  для формирования диаграммы направленности фазированной антенной решеткой радиотелескопа БСА ФИАН. Показана частотная зависимость положения лучей фазированной решетки в пространстве. Рассмотрено влияние положения электрической оси антенны на гармоники главного луча, формируемого на первом этаже фазирования антенны, а также на диаграмму направленности антенны в целом. Показана зависимость амплитуды гармоник основного луча антенны от положения луча относительно диаграммы направленности первого этажа фазирования антенной решетки.

Приведены результаты моделирования диаграммы направленности в зависимости от частоты и экспериментальное подтверждение модельных расчетов по наблюдениям отдельных источников. На примере суточного обзора неба показана регистрация мощных радиоастрономических источников в кратных гармониках главного луча, амплитуда гармоник может достигать 10 % от основного луча, превышая уровень боковых лепестков.

Учет особенностей диаграммы направленности фазированной антенной решетки радиотелескопа БСА ФИАН, формируемой с использованием матриц Батлера  $16 \times 16$ , является критически необходимым при поиске пульсаров и транзиентов при отождествлении слабых источников.

**Ключевые слова:** антенная решетка, диаграмма направленности, матрица Батлера, радиотелескоп.

*Контакты для связи:* Орешко Василий Васильевич ([oreshko@prao.ru](mailto:oreshko@prao.ru)).

**Для цитирования:** Орешко В. В. Особенности формирования диаграммы направленности антенны БСА ФИАН с использованием матриц Батлера // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 64. С. 31–37.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.31-37>

## Features of the Beamforming Using Butler Matrices for BSA LPI Antenna

V. V. Oreshko

P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, PRAO ASC LPI, Pushchino, Russia

### Abstract

The paper considers the use of  $16 \times 16$  Butler matrices to form the radiation pattern of the phased array antenna of the BSA LPI radio telescope. The frequency dependence of the position of the beams phased array on sky is shown. The influence of the position of the electrical axis of the antenna on the harmonics of the main beam formed on the first floor of the antenna phasing, as well as on the antenna directional diagram as a whole, is considered. The dependence of the amplitude of the harmonics of the main beam of the antenna on the position of the beam relative to the radiation pattern of the first floor of the antenna array phasing is shown.

The results of modeling the radiation pattern depending on the frequency and experimental confirmation of model calculations based on observations of sources are presented. Using the example of a daily sky survey, the registration of powerful radio astronomical sources in multiple harmonics of the main beam is shown, the amplitude of harmonics can reach 10 % of the main beam, exceeding the level of the side lobes.

Taking into account the peculiarities of the radiation pattern of the phased array antenna array of the BSA LPI radio telescope, formed using  $16 \times 16$  Butler matrices, is critically necessary when searching for pulsars and transients, when identifying weak sources.

**Keywords:** antenna array, radiation pattern, Butler matrix, radio telescope.

*Contacts:* Vasily V. Oreshko ([oreshko@prao.ru](mailto:oreshko@prao.ru)).

**For citation:** Oreshko V. V. Features of the beamforming using Butler matrices for BSA LPI antenna // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 64. P. 31–37.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.31-37>

## Введение

Радиотелескоп БСА ФИАН, работающий в метровом диапазоне радиоволн, предназначен в основном для исследования пульсаров, мерцающих источников, межпланетной и околосолнечной плазмы. Антенна радиотелескопа представляет собой фазированную антенную решетку (ФАР) из 16384 волновых диполей с рефлектором, размещенных на площади  $200 \times 400$  м. Диаграмма антенны фиксирована в Е-плоскости (восток — запад) по нормали к плоскости горизонта и имеет электронно-управляемое сканирование в Н-плоскости (север — юг), т. е. радиотелескоп БСА является инструментом меридианного типа.

64 волновых диполя, ориентированные в направлении восток — запад, образуют дипольный ряд, в котором диполи фазированы по нормали к оси ряда с помощью отрезков двухпроводных симметричных открытых линий. Центральная частота настройки дипольного ряда соответствует 111 МГц, рабочая полоса частот 109–113 МГц. Ширина диаграммы направленности дипольного ряда по уровню 0.5 в Е-плоскости (по прохождению источника) равна 45 угл. мин, в Н-плоскости (по склонению) диаграмма соответствует диаграмме диполя с рефлектором и равна 120 угл. град. Антенное поле содержит 256 дипольных рядов, расположенных в направлении север — юг с интервалом 1.5 м. На выходе дипольного ряда установлен малошумящий усилитель с 4 равнозначными выходами, что позволяет подключить до 4 диаграммообразующих систем для формирования диаграммы направленности антенны в Н-плоскости.

Фазирование антенны выполняется в два этапа с использованием матриц Батлера ([Butler et al., 1961](#)): сначала формируется диаграмма антенного полотна для 16 дипольных рядов, затем из 16 антенных полотен формируется диаграмма направленности антенны. Для формирования управляемой диаграммы направленности (ДН) используются матрицы Батлера с коммутируемыми входами и выходами. Фазовая матрица рассчитывается на заданную частоту и может эффективно работать в ограниченной полосе частот, как правило в пределах  $\pm 2\text{--}3\%$  от центральной частоты. В состав фазирющей системы также входят радиочастотные фидеры, временная задержка в которых определяет положение электрической оси антенны.

Использование фазовых матриц в антенной решетке обуславливает частотную зависимость положения формируемых лучей антенны в пространстве, а двухэтажное фазирование вызывает модуляцию конечных лучей антенной решетки

диаграммой направленности антенного полотна. Соответственно характеристики лучей антенной решетки существенно зависят от частоты и направления лучей антенны. Далее мы рассмотрим особенности формирования диаграммы направленности антенны БСА ФИАН с использованием матриц Батлера, частотную зависимость положения лучей антенны, наличие кратных гармоник основного луча (главного максимума ФАР) и их уровень.

## Формирование луча антенны радиотелескопа БСА

В 2010–2020 гг. была проведена модернизация радиотелескопа, созданы две новые диаграммообразующие системы, формирующие независимые ДН антенны: многолучевую ДН и управляемую ДН. Многолучевая ДН включает в себя 128 лучей в секторе склонений источников на небе от  $-8^\circ$  до  $+55^\circ$ . Управляемая ДН переключается в секторе от  $-12^\circ$  до  $+87^\circ$ , формируется одновременно 16 лучей с возможностью использования любого из 16 лучей отдельно. Обе диаграммообразующие системы основаны на фазовых матрицах Батлера размерности  $16 \times 16$ , что определяет фазовый шаг матрицы равным  $22.5^\circ$ .

Система диаграммообразования антенны БСА в Н-плоскости состоит из фидерной системы и матриц Батлера  $16 \times 16$ . Фидерная система соединяет выходы дипольных рядов со входами фазирющих матриц, а также выходы матриц антенных полотен и входы центральных матриц. Все фидеры калиброваны по электрической длине. Величина временной задержки в фидерной системе определяет положение электрической оси (нулевого луча) для фазированной антенной решетки. В системе фазирования с использованием матриц Батлера соседние лучи пересекаются на уровне 0.4 по мощности, что при использовании 2-этажной системы фазирования вносит модуляцию мощности первым этажом фазирования глубиной до 60 % для конечных лучей диаграмм направленности. Для снижения этого эффекта на первом этапе фазирования формируется дополнительная диаграмма полотна, так называемая диаграмма «штрих», сдвинутая относительно основной на половину ширины луча диаграммы полотна за счет использования дополнительных фазовых задержек.

Диаграмма направленности отдельного луча антенны БСА, являясь производением диаграммы направленности диполя с рефлектором, множителя решетки полотна антенны из 16 дипольных рядов и множителя решетки из 16 антенных полотен, описывается следующей формулой:

$$F_{(m1,m2,sh1,sh2)} = \sin(k \cdot h \cdot \cos(\varphi)) \times \frac{\sin(8 \cdot (1.5 \cdot k \cdot \sin(\varphi) - 1.5 \cdot k \cdot \sin(\theta_0) - sh1 \cdot (\Delta\varphi)/2 - m1 \cdot (\Delta\varphi))}{16 \cdot \sin\left(0.5 \cdot \left(1.5 \cdot k \cdot \sin(\varphi) - 1.5 \cdot k \cdot \sin(\theta_0) - sh1 \cdot \frac{(\Delta\varphi)}{2} - m1 \cdot (\Delta\varphi)\right)\right)} \times \\ \times \frac{\sin(8 \cdot (24 \cdot k \cdot \sin(\varphi) - 24 \cdot k \cdot \sin(\theta_0) - sh2 \cdot (\Delta\varphi)/2 - m2 \cdot (\Delta\varphi))}{16 \cdot \sin\left(0.5 \cdot \left(24 \cdot k \cdot \sin(\varphi) - 24 \cdot k \cdot \sin(\theta_0) - sh2 \cdot \frac{(\Delta\varphi)}{2} - m2 \cdot (\Delta\varphi)\right)\right)},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — коэффициент фазы;  $h = 0.63$  м — расстояние между диполем и рефлектором;  $\varphi$  — угол отклонения от нормали к плоскости антенной решетки;  $\theta_0$  — угол отклонения электрической оси от нормали;  $sh1$  и  $sh2$  — коэффициенты сдвига соответственно для матриц первого и второго этажа фазирования, равен 0 для основной или 1 для диаграммы «штрих»;  $m1$  — номер фазовой задержки для выхода матрицы полотна (от  $-8$  до  $+7$ );  $m2$  — номер фазовой задержки для выхода центральной матрицы (от  $-8$  до  $+7$ );  $\Delta\varphi$  — фазовый шаг матрицы.

Функция множителя решетки является периодической, вследствие чего в секторе действительных углов может формироваться несколько главных дифракционных максимумов. Для нормальной работы антенной решетки необходимо, чтобы отсутствовали дифракционные максимумы высших порядков и существовал только один главный максимум. Это требование выполняется, если расстояние между элементами решетки не превышает половины длины волны (Воскресенский и др., 1981). Расстояние между дипольными рядами антенны БСА равно 1.5 м, что обеспечивает наличие только одного дифракционного максимума для антенного полотна. С помощью матрицы  $16 \times 16$  формируются 16 лучей антенного полотна,  $\pm 8$  лучей относительно электрической оси в соответствии с фазовым шагом  $22.5^\circ$  в пределах от  $0^\circ$  до  $\pm 180^\circ$ . Максимум основного (нулевого) луча совпадает с электрической осью антенны, остальные лучи располагаются симметрично по отношению к нему.

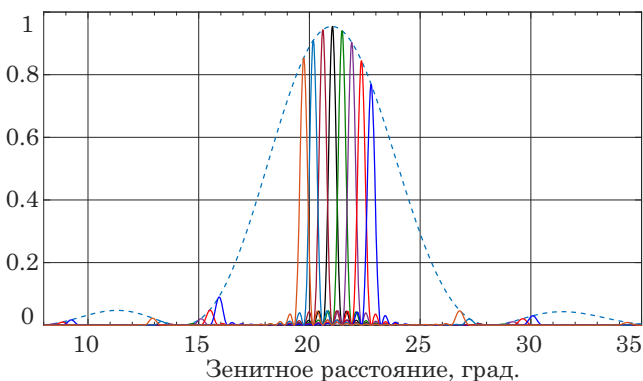


Рис. 1. Лучи антенны БСА в пределах диаграммы антенного полотна

При использовании далеких от электрической оси лепестков полотна фазированной антенной решетки ширина луча антенны увеличивается в рабочей полосе частот с увеличением номера лепестка и снижается усиление антенны. Для БСА сектор обзора неба смещен от нормали к плоскости антенны, следовательно необходимо сместить электрическую ось антенны, чтобы использовать в работе близкие к электрической оси лучи ФАР и тем самым повысить эффективность антенны. Для многолучевой ДН электрическая ось антенны БСА в Н-плоскости смещена на  $21.04^\circ$  для основной и на  $24.54^\circ$  — для штриховой, а для управляемой ДН — на  $14.0^\circ$  от нормали.

Пример расчетной диаграммы направленности антенны на выходе матрицы второго этажа фазирования в пределах диаграммы антенного полотна приведен на рис. 1. Штриховой линией показана ДН антенного полотна, соответствующая выходу матрицы первого этажа с нулевыми фазовыми задержками и совпадающая с электрической осью антенны. Из 16 лучей, формируемых на выходе матрицы второго этажа, используется только 8 лучей, уровень которых превышает 80 % от максимума луча, расположенного по оси луча антенного полотна.

#### Частотная зависимость диаграммы направленности антенны радиотелескопа БСА

В формуле диаграммы направленности антенной решетки фазовый коэффициент зависит от рабочей длины волны, что определяет частотную зависимость положения луча антенны в пространстве. С ростом величины фазовой задержки для выходов матрицы будет расти и влияние частоты сигнала на ДН. На рис. 2 показано положение лучей в пространстве в направлении, совпадающем с электрической осью антенны для 8 выходов матрицы на частотах 109.2, 110.2 и 111.2 МГц. Диапазон частот выбран исходя из рабочей полосы регистраторов радиотелескопа 109–111.5 МГц. На рисунке можно видеть, что по электрической оси антенны направления лучей на разных частотах совпадают, а с ростом углового расстояния от оси антенны расхождение лучей антенны в пространстве для разных частот возрастает.

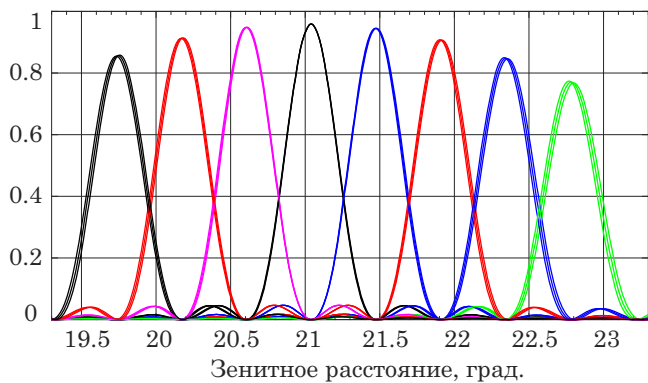


Рис. 2. Положение лучей в пространстве для частот 109.2, 110.2 и 111.2 МГц в направлении электрической оси антенны

Моделируя диаграмму направленности на различных частотах для разных зенитных углов, можно определить зенитное расстояние, при котором на крайних частотах диапазона работы радиотелескопа мощность принимаемого сигнала будет соответствовать половине мощности с направления луча на центральной частоте, пример приведен на рис. 3. Показано смещение в пространстве для отдельного луча антенны в зависимости от частоты. Зенитное расстояние при этом условии равно  $44^\circ$ , что соответствует  $23^\circ$  отклонения от электрической оси антенны.

Экспериментальное подтверждение модельных расчетов ДН можно получить из наблюдений радиоастрономических источников. Зенитному расстоянию в  $44^\circ$  при широте  $54.82^\circ$  местоположения радиотелескопа БСА для источников на небе соответствует угол склонения равный  $11^\circ$ . Ярким дискретным источником с подходящими координатами является источник 3C274 (Дева А) с координатами на 2022 г.  $\alpha = 12^{\text{h}}31^{\text{m}}56.17^{\text{s}}$ ,  $\delta = 12^\circ16'11.3''$ . Многоканальный цифровой приемник радиотелескопа

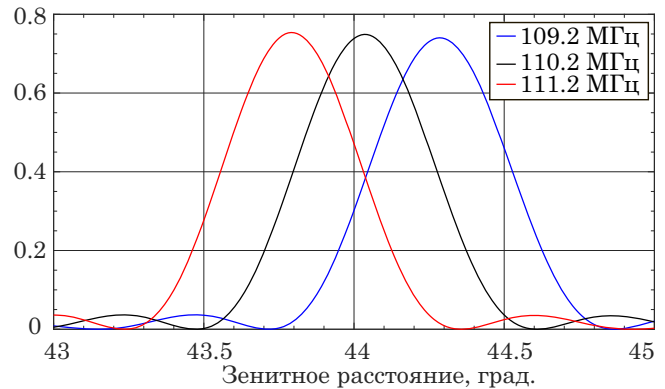


Рис. 3. Положение луча в пространстве для частот 109.2, 110.2 и 111.2 МГц при отклонении на  $23^\circ$  от электрической оси антенны

в стандартном режиме регистрации записывает принимаемый сигнал в 6 частотных каналах с полосой частот в канале 0.415 МГц, что позволяет сравнить положение источника в лучах антенны в зависимости от частоты. На рис. 4 показаны построенные по результатам наблюдений на радиотелескопе БСА яркостные карты неба в секторе склонений от  $-8^\circ$  до  $+21^\circ$  (1–48 лучи антенны) на интервале времени 2 ч. Первая карта неба показывает наблюдаемые источники на частоте 109.21 МГц, вторая — на частоте 111.28 МГц. Хорошо заметен переход источника 3C274 из 32-го в соседний 31-й луч антенны, что соответствует расчетному сдвигу луча антенны для этих частот.

Используемое на практике максимальное отклонение луча антенны БСА от зенита не превышает  $63^\circ$ , что соответствует снижению эффективной площади и углового разрешения антенны в два раза по сравнению с зенитным направлением. При этом на крайних частотах рабочей полосы в направлении, соответствующему центральной

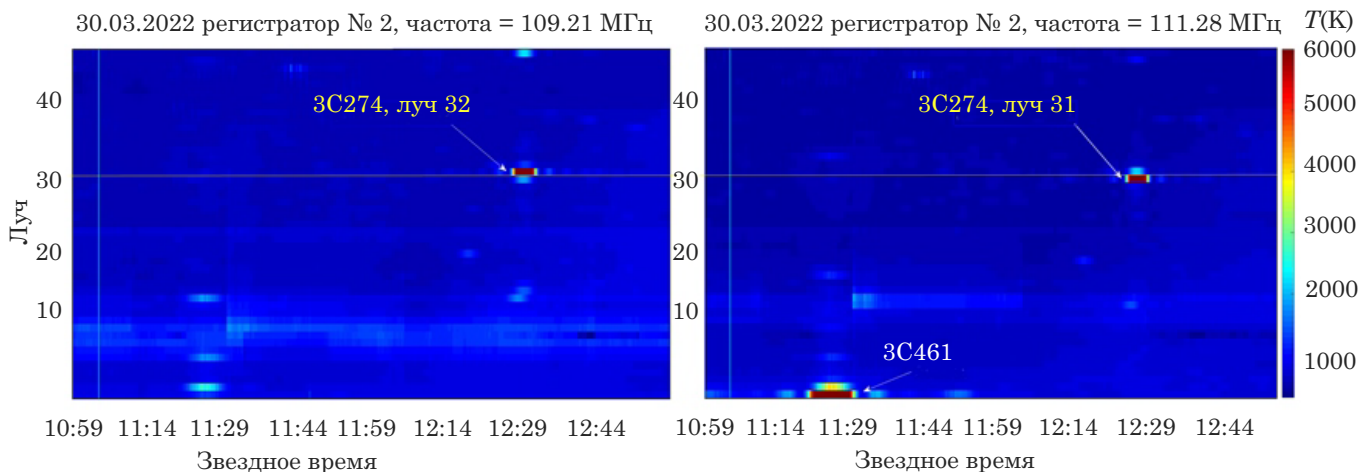


Рис. 4. Наблюдаемый на БСА сектор неба в 48 лучах антенны (склонения от  $-8^\circ$  до  $+21^\circ$ )



полосе частот (направлении, выбранном на источник), наблюдаемый уровень сигнала будет в пределах 27–28 % от уровня на центральной частоте. В этом случае для эффективного использования всей полосы частот антенны необходимо регистрировать сигнал источника на разнесенных частотах в соседних лучах антенны, в ином случае использование полной полосы приема будет приводить к потере чувствительности радиотелескопа.

### Гармоники основного луча диаграммы направленности антенны радиотелескопа БСА

Как уже упоминалось, для антенного полотна с расстоянием между дипольными рядами 1.5 м на частоте 110 МГц формируется только один дифракционный максимум в секторе действительных углов антенны. В то же время расстояние между антенными полотнами составляет 24 м, что значительно больше, чем половина длины волны. Вследствие этого при формировании луча антенны БСА из 16 антенных полотен, помимо основного луча антенны, в зоне действительных углов формируются и его гармоники. Подавление гармоник луча антенны обеспечивается за счет ДН антенного полотна. Для антенного полотна формируется только один луч и отсутствуют его гармоники при условии, что электрическая ось антенного полотна совпадает с нормалью к его плоскости. Смещая электрическую ось антенны относительно нормали к плоскости антенны, мы сдвигаем не только основной луч, но и его кратные гармоники, что вызывает их появление в зоне действительных углов антенны. Появление гармоники основного луча антенного полотна в секторе действительных углов означает, что в этом направлении отсутствует подавление гармоник луча антенны и возникает неоднозначность в направлении приема.

Смещение электрической оси антенны БСА необходимо для снижения частотной зависимости ДН антенны в секторе основных наблюдаемых источников на небе. Для управляемой ДН электрическая ось антенны смещена на  $14^\circ$  от нормали к плоскости антенны. При таком смещении оси гармоника луча антенного полотна при отклонении от зенита до  $60^\circ$  не превышает по амплитуде 10 % от максимума луча антенны, что допустимо при наблюдениях пульсаров и других дискретных источников.

Для многолучевой ДН антенны используется максимальное смещение электрической оси равное  $24.54^\circ$ . Величина смещения оси выбрана для мониторинга источников, мерцающих на неоднородностях околосолнечной плазмы, с целью приближения к оптимуму антенны по частоте на склонениях близких к эклиптике. Такое смещение электрической оси антенны увеличивает влияние

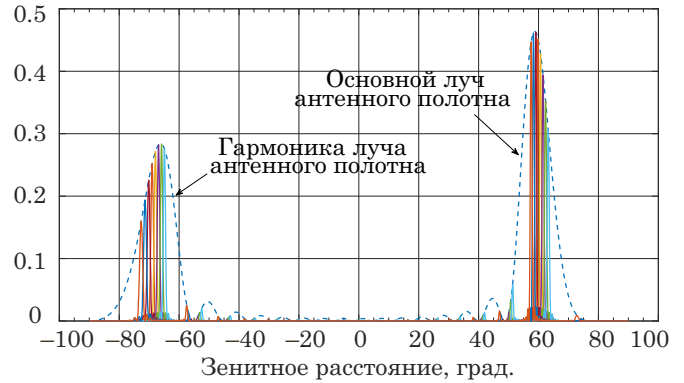


Рис. 5. Гармоника основного луча антенного полотна

гармоники луча антенного полотна, подавление гармоник основных лучей будет недостаточным. На рис. 5 приведены результаты расчета диаграммы для наиболее низких по склонению лучей многолучевой ДН антенны. Здесь амплитуда гармоник лучей антенны сопоставима с основными лучами, что вызывает неоднозначность в определении направления приема сигнала.

Максимальное отклонение от зенита для основных лучей антенны не превышает  $+63^\circ$ , а гармоники основных лучей антенны, которые проявляются в гармонике луча антенного полотна, находятся к северу от зенита на угловом расстоянии от  $-64^\circ$ . С учетом места размещения радиотелескопа БСА, угловое расстояние между гармониками основных лучей и полюсом составляет примерно  $30^\circ$ , а для основных лучей  $90^\circ$ . Как известно, скорость прохождения источника через диаграмму антенны для меридианного инструмента уменьшается пропорционально косинусу угла между направлением на источник и плоскостью небесного экватора. Этот эффект можно использовать при отождествлении источников и регистрации сигнала в лучах с максимальным отклонением от зенита. Для основных лучей время прохождения источника через диаграмму направленности будет примерно в 2 раза меньше, чем для их гармоник.

Экспериментальное подтверждение можно увидеть на рис. 4.: в первом луче, соответствующем склонению  $-8^\circ$  на частоте 111.28 МГц, наблюдается яркий источник, звездное время кульминации для него соответствует 11 ч 24 м. При этом длительность времени прохождения через ДН антенны для этого источника в 2 раза больше, чем расчетное на этих склонениях. Столь ярких источников на небе для этого склонения не существует, а время кульминации источника соответствует нижней кульминации источника 3С461 (Кассиопея А) при угле  $24^\circ$  над горизонтом в северном направлении. Это направление совпадает с гармоникой основного луча антенны в пределах первой гармоники антенного полотна. Можно сделать однозначный вывод, что в первом луче антенны,

соответствующему склонению  $-8^\circ$ , мы наблюдаем в гармонике этого луча незаходящий источник 3C461 с координатами на эпоху 2000 г.  $\alpha = 23^h 23^m 27.94^s$ ,  $\delta = 58^\circ 48' 42.4''$  в его нижней кульминации.

За исключением направления, совпадающего с гармоникой луча антенного полотна, гармоники основного луча антенны подавляются за счет ДН антенного полотна. При совпадении луча антенны с осью луча антенного полотна его гармоники совпадают с «нулем» диаграммы полотна, рис. 6. В этом случае формируется только основной луч и его боковые лепестки, гармоники высших порядков отсутствуют. В случае отклонения луча антенны от оси антенного полотна смещаются также и его гармоники. Их подавление будет зависеть от величины смещения и будет минимальным для максимального смещения луча. Для формирования многолучевой диаграммы используется только 8 из 16 возможных лучей на выходе матрицы Батлера  $16 \times 16$ . Максимальное смещение луча антенны от оси диаграммы полотна в этом случае соответствует 4-кратной ширине луча по уровню 0.4 от максимума.

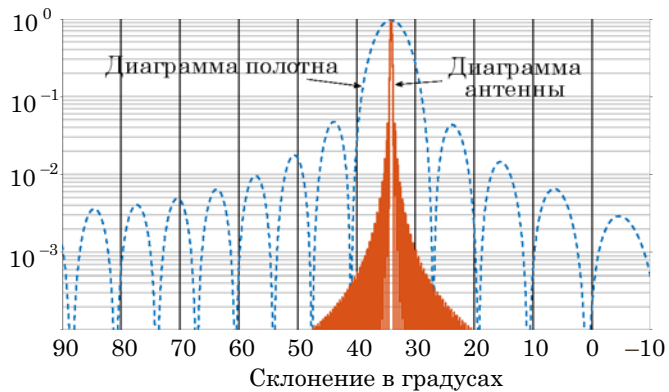


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны по оси диаграммы антенного полотна

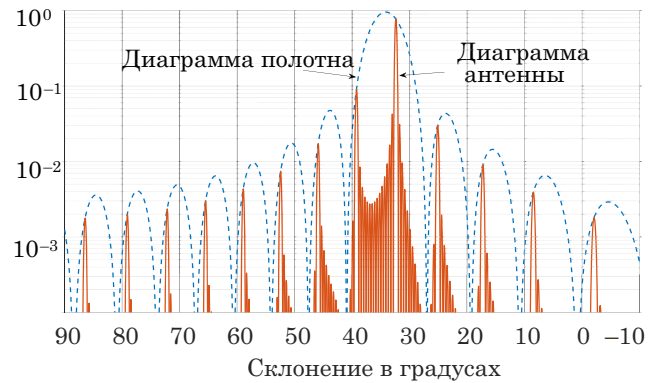


Рис. 7. Диаграмма направленности антенны со смещением от оси диаграммы антенного полотна

На рис. 7 приведены результаты расчета для луча антенны с максимальным смещением от оси диаграммы антенного полотна. В этом случае подавление гармоник минимально, амплитуда первой гармоники луча антенны заметно выше уровня первого бокового лепестка и последующие гармоники также имеют значимый уровень.

На рис. 8 показана карта неба в диапазоне склонений от  $-8^\circ$  до  $+55^\circ$  (128 лучей антенны) на 22 марта 2022 г., построенная по результатам мониторинга неба в течение суток на радиотелескопе БСА ФИАН. Мощность сигнала наблюдаемых источников приведена в шкале температур в логарифмическом масштабе. Цветовая шкала ограничена 2500 К, но максимальная температура источника на данной карте 118000 К (3C405).

На рисунке на примере источника 3C461 (Кассиопея А) видим прохождение источника через гармоники основного луча во всем диапазоне склонений, в то время как сам источник (склонение  $58^\circ 48' 42.4''$  на эпоху 2000 г.) не попадает в поле зрения радиотелескопа. Также на карте можно видеть гармоники основного луча по прохождению

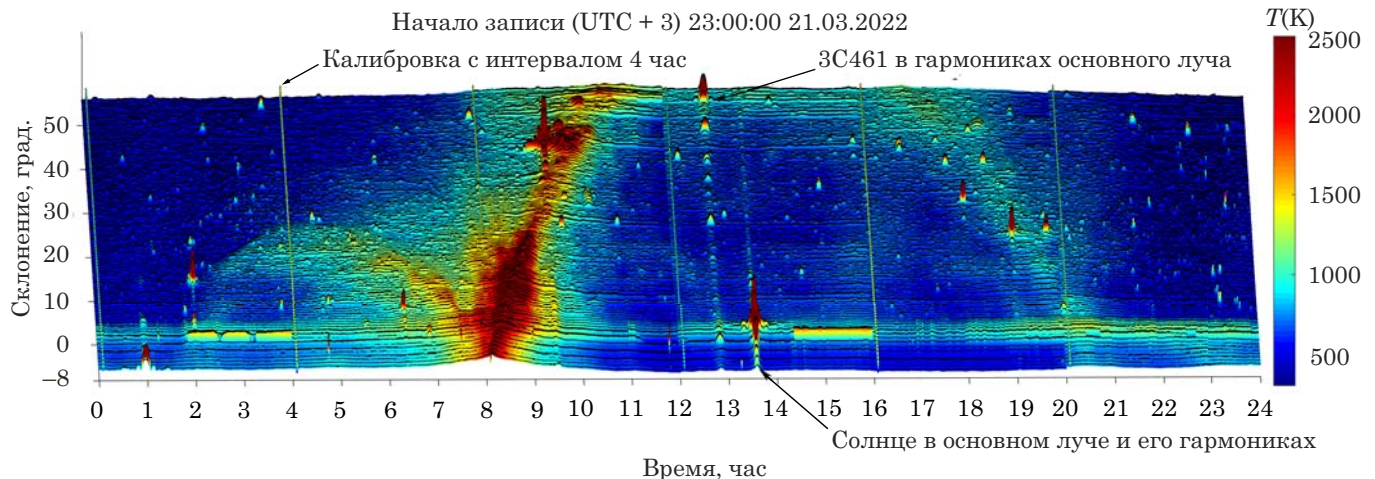


Рис. 8. Карта неба в диапазоне склонений от  $-8^\circ$  до  $+55^\circ$  построенная по результатам мониторинга неба в течение суток на радиотелескопе БСА ФИАН

Солнца, 3C405 (Лебедь А) и других источников с высоким потоком радиоизлучения. С учетом того, что спектральная плотность потока излучения достаточно большого числа источников в наблюдаемом секторе на небе на 2–5 порядков превышает порог чувствительности радиотелескопа, при исследовании слабых источников, поиске пульсаров и транзиентов необходимо учитывать наличие, уровень гармоник луча и их совпадение с координатами сильных источников.

### Заключение

Диаграмма направленности радиотелескопа БСА, сформированная с помощью матриц Батлера  $16 \times 16$ , является частотно-зависимой, что необходимо учитывать при определении наблюдаемых координат источника на небе и достижения максимальной чувствительности в полной полосе приема. При отклонениях от электрической оси антенны более чем на  $\pm 23^\circ$  эффективная полоса приема сужается, использование полной полосы частот приведет к потере чувствительности радиотелескопа.

Из-за значительного смещения электрической оси антенны многолучевой диаграммы наклонениях от  $-8^\circ$  до  $-2^\circ$  сигнал со сравнимым уровнем также принимается в гармониках основных лучей в пределах 1-й гармоники луча полотна антенны.

Селекция направления приема регистрируемых источников возможна по времени прохождения источника через диаграмму направленности антенны.

Уровень подавления гармоник главного максимума луча антенны зависит от отклонения его оси от оси луча полотна антенны, формируемого на первом этаже фазирования. Уровень гармоник луча может превышать уровень первого бокового лепестка основного луча.

Учет особенностей диаграммы направленности фазированной антенной решетки радиотелескопа БСА ФИАН, формируемой с использованием матриц Батлера  $16 \times 16$ , является критически необходимым для обеспечения максимальной чувствительности радиотелескопа на низких наклонениях, при поиске пульсаров и транзиентов, при отождествлении слабых источников.

### Литература

*Воскресенский Д. И., Грановская Р. А., Давыдова Н. С. и др.* Антенны и устройства СВЧ (Проектирование фазированных антенных решеток). М.: Радио и связь, 1981. 432 с

*Butler J., Lowe R.* Beam forming matrix simplifiers design of electrically scanned antennas // *Electronic Design*. 1961. Vol. 9. P. 170–173.