

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ У АНТЕНН ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ (АПП)

Н. Л. Кайдановский

Рассмотрена возможность образования многолучевых диаграмм направленности АПП с целью применения их для одновременного определения обеих координат точечного источника, а также для измерения распределения яркости протяженных источников.

A possibility of formation of multibeam directivity diagrams of the variable profile antenna (VPA) is considered. The diagrams are to be used for simultaneous measurements of both coordinates of celestial bodies and also of brightness distribution of extended sources.

Принципиальные возможности образования многолучевых диаграмм направленности

Гибкость отражающей поверхности АПП, состоящей из отдельных отражающих секций [1—3], позволяет изменять высоту и азимут точки наблюдения при неизменном положении первичного облучателя. Это свойство может быть использовано для образования многолучевых диаграмм направленности, а также — при наличии автоматического управления отражающими секциями — для сопровождения источников в ограниченных пределах.

Изменение направления наблюдения при неизменном положении облучателя достигается за счет переноса центра исходной окружности, относительно которой строится профиль отражателя. Поперечное смещение центра относительно начальной оси отражателя вызывает изменение азимута. Продольное смещение центра, связанное с изменением величины радиуса, меняет высоту точки наблюдения (рис. 1) [2].

Для образования многолучевой диаграммы направленности различные участки отражающей поверхности должны быть установлены для наблюдения в различных направлениях и иметь общий фокус. Плоскости ножей парциальных диаграмм направленности от боковых участков отражающей поверхности будут развернуты друг относительно друга на угол, зависящий от углового расстояния между серединами соответствующих дуг в плоскости раскрытия и от условий облучения (рис. 2 и 3).

Обозначим ϵ угол между плоскостью ножа парциальной диаграммы направленности и плоскостью симметрии дуги начальной окружности антенны, из которой образована многопрофильная отражающая поверхность.

При равномерном распределении поля на раскрытие плоскость ножа парциальной диаграммы будет перпендикулярна хорде, стягивающей

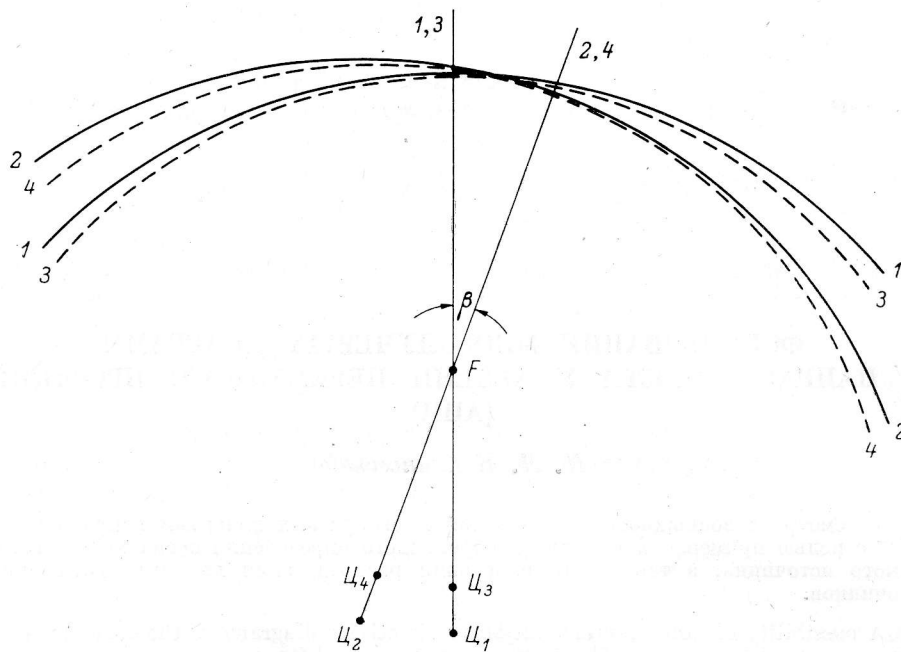


Рис. 1. Исходная окружность.

1 — начальная; 2 — при поперечном смещении центра и неизменном радиусе; 3 — начальная уменьшенного радиуса; 4 — уменьшенного радиуса при смещенном азимуте.

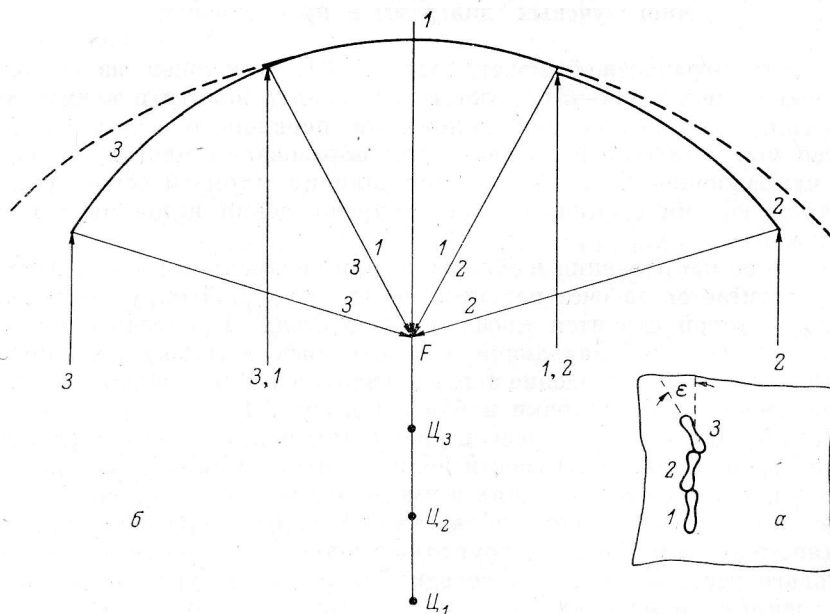


Рис. 2. Трехлучевая диаграмма направленности для разных высот в одном азимуте.

Смещение центров для наглядности утрировано. Фактическое смещение при сдвиге на ширину одной диаграммы незначительно.
 а — сечение трехлучевой диаграммы направленности; б — схема разбивки начальной окружности (пунктир) на 3 сектора с различными радиусами.

соответствующую дугу в раскрыве. В этом случае угол ϵ будет равен угловой координате середины дуги в плоскости раскрыва относительно плоскости симметрии антенны [4, 5]. Лучи диаграммы направленности

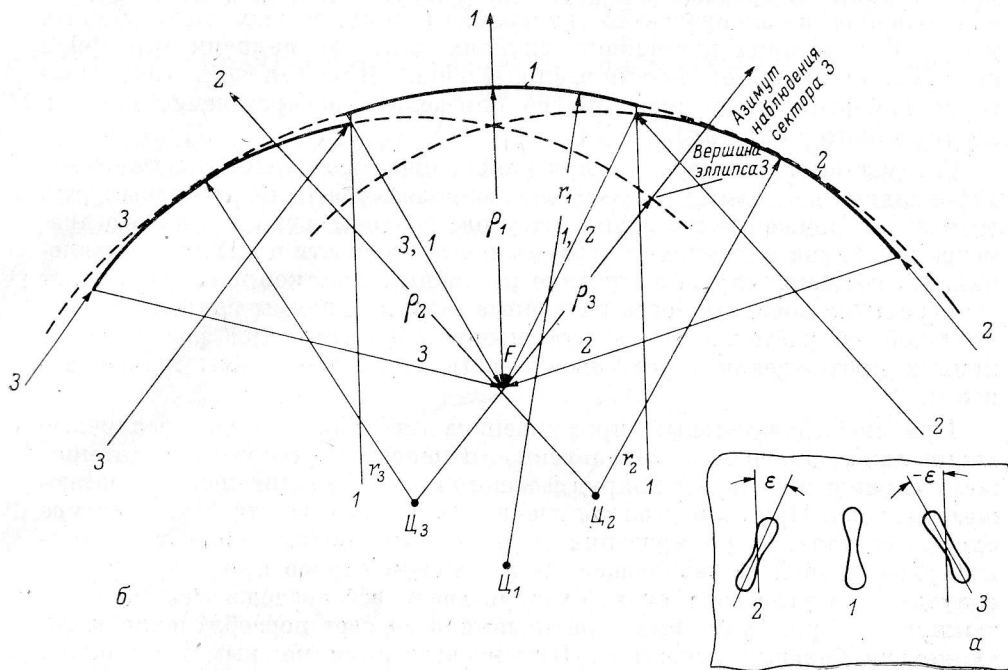


Рис. 3. Трехлучевая диаграмма направленности для разных азимутов при одной высоте.

Смещение по азимуту утрировано для наглядности; обычно необходимое смещение меньше одного градуса.
 α — сечение трехлучевой диаграммы направленности; б — схема разбиения начальной окружности (пунктир) на 3 сектора с различными азимутами наблюдений. Отношение $r_n/\rho_n = \text{const}$.

можно расположить в одном азимуте, но на разных высотах с целью увеличения ее вертикального размера (рис. 2). Это может быть полезно для ускорения обзора неба или при исследовании распределения яркости протяженного источника методом последовательного апертурного синтеза [6]. Можно также расположить лучи диаграммы направленности в разных азимутах на одной или разных высотах таким образом, чтобы источник проходил через них последовательно (рис. 3). Ряд кривых проходов через смещенные диаграммы направленности позволяет изучать нестационарные явления на источнике; он может быть также использован для определения обеих координат ряда точечных источников, например активных областей на Солнце. Так, угловые координаты источника относительно плоскости симметрии

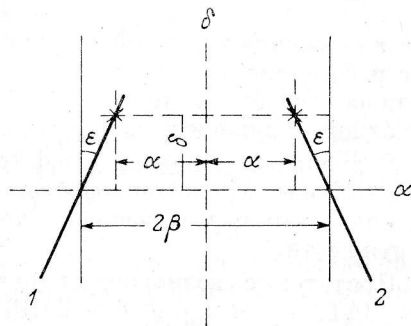


Рис. 4. К определению координат источника.

Пояснения в тексте.

двухлучевой диаграммы α и плоскости, проходящей через оси диаграмм направленности δ (рис. 4), в моменты τ_1 и τ_2 прохода источника через парциальные диаграммы, отстоящие по азимуту на угол 2β , равны

$$\alpha = \pm (\tau_2 - \tau_1) \Omega / 2, \quad \delta = [2\beta - (\tau_2 - \tau_1) \Omega] / 2 \operatorname{tg} \epsilon, \quad (1)$$

где Ω — азимутальная скорость источника. Как следует из (1), при $\varepsilon < 45^\circ$ координата δ определяется грубее, чем α .

Прохождение протяженного источника через ряд повернутых диаграмм направленности эквивалентно измерениям при разных позиционных углах. В некоторых простейших случаях (или при наличии априорной информации, например, знания распределения яркости спокойного Солнца) такие измерения позволяют быстро определить распределение яркости протяженного источника.

Следует иметь в виду, что при измерениях протяженных источников парциальные диаграммы направленности должны быть расставлены вдоль траектории движения источника на угол, больший суммы углового диаметра источника и ширины диаграммы направленности в том же направлении. В противном случае излучение различных участков источника будет одновременно попадать через различные лучи диаграммы направленности в общий облучатель, что внесет неопределенность при расшифровке кривых прохождений через совокупность лучей диаграммы направленности.

При последовательных прохождениях источника через различные парциальные диаграммы направленности первичные облучатели антенны желательно поворачивать вокруг фазового центра в направлении работающего сектора. При этом угол облучения должен соответствовать апертуре одного сектора, а поляризация должна быть оптимальной по кросс-поляризационной составляющей. В противном случае при неподвижном облучателе и угле облучения, охватывающем все последовательно работающие сектора, будут иметь место потери за счет переоблучения и несимметрии боковых лепестков. При исследовании мощных источников, например Солнца, переоблучение и соответствующие потери эффективной площади антенны можно считать допустимыми и оправданными удобством работы при неподвижном облучателе.

Профиль отражающей поверхности каждого из секторов образуется путем радиального смещения отражающих секций от исходной окружности и их поворотов по азимуту и углу места таким образом, чтобы в сечении образовалась дуга эллипса с оптимальным параметром

$$P = r - \sqrt{r^2 - r_{\min}^2} \cos h,$$

где r — радиус исходной окружности данного сектора, r_{\min} — минимальное расстояние от центра до дуги эллипса и h — угол места. Ось эллипса должна лежать в вертикальной плоскости, проходящей через центр исходной окружности данного сектора и общий фокус (рис. 3).

Радиальное смещение и азимутальный поворот отражающих секций должны обеспечить как образование дуги исходной окружности из начальной, так и построение эллипса относительно выбранной исходной окружности.

Предельные возможности механизма азимутального поворота ($\pm 6^\circ$ для РАТАН-600 и $\pm 3^\circ$ для БПР) могут в некоторых случаях ограничить построение многолучевой диаграммы направленности. Ограничения по величине радиального смещения можно преодолеть с помощью эшелонирования отражателя на целое число длин волн. Однако этот путь нежелателен, так как лишает АПП одного из важных преимуществ — возможности одновременного приема в широкой полосе частот на волнах различной длины.

Применительно к конкретной наблюдательной задаче следует искать оптимальную геометрию отражающей поверхности, которую можно реализовать без применения эшелонирования и в пределах углов, допускаемых

механизмом азимутального поворота. В качестве примера далее рассмотрена возможность образования двухлучевой диаграммы направленности для наблюдения локальных источников радиоизлучения (ЛИР) на Солнце.

Двухлучевая диаграмма направленности для наблюдения Солнца на БПР

Ножевая диаграмма АПП не позволяет определить обе координаты ЛИР из одного наблюдения. Для этого нужно повторить наблюдения Солнца при другом позиционном угле. На БПР имеется возможность производить наблюдения в азимутах $\pm 15^\circ$. Однако такие наблюдения

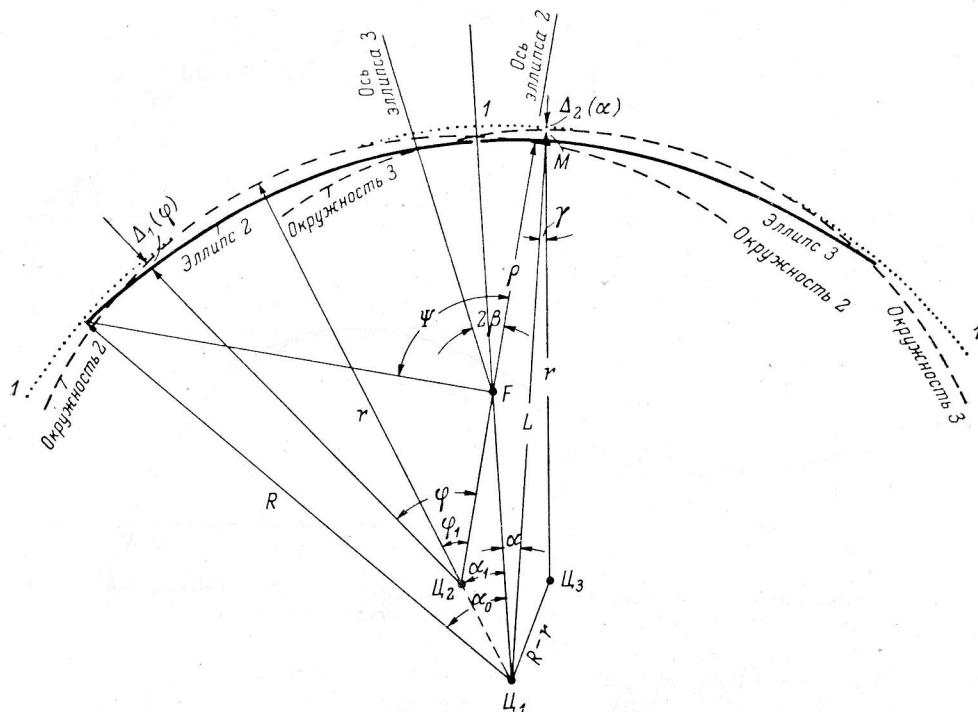


Рис. 5. Образование двухлучевой диаграммы направленности.

Пунктир 1 — начальная окружность с радиусом R ; штрих-пунктир 2 и 3 — исходные окружности секторов с радиусом r ; 2β — угол между азимутами парциальных диаграмм направленности; p — фокусное расстояние; $\Delta_1(\varphi)$ — радиальное смещение от исходных окружностей 2 и 3 для образования участков эллипсов 2 и 3; $\Delta_2(\alpha)$ — радиальное смещение от начальной окружности 1 для образования исходных окружностей 2 и 3.

требуют значительного времени и трудоемких работ на установке облучателя. Поэтому применение для исследования Солнца на БПР двухлучевой диаграммы направленности, хотя бы и с пониженной разрешающей силой, представляет значительный интерес.

Для построения двухлучевой диаграммы направленности разобьем отражающую поверхность на два симметричных сектора (рис. 5) таким образом, чтобы азимутальный угол между лучами 2β был больше суммы углового диаметра Солнца и ширины парциальной диаграммы направленности АПП.

Для разбивки отражающей поверхности на два сектора впишем в начальную окружность 1 (рис. 5) две исходные окружности 2 и 3, относительно которых вдоль эллипсов 2 и 3 будут устанавливаться секции

отражающей поверхности. Исходные окружности 2 и 3 должны касаться начальной в точках с азимутами $\pm \alpha_1$, где радиальные смещения $\Delta_1(\varphi_1)$ от исходных окружностей 2 и 3 к соответствующим эллипсам 2 и 3 близки максимальному. При этом центры окружностей Π_2 и Π_3 будут лежать соответственно на пересечении радиусов R , идущих под углами $\pm \alpha_1$, с прямыми, проходящими через общий фокус F под углами $\pm \beta$ от плоскости симметрии.

При таком построении исходных окружностей общее радиальное смещение $\Delta = \Delta_1(\varphi) + \Delta_2(\alpha)$, равное сумме смещений $\Delta_2(\alpha)$ от начальной окружности 1 к исходным 2 и 3 и от них к соответствующим эллипсам 2

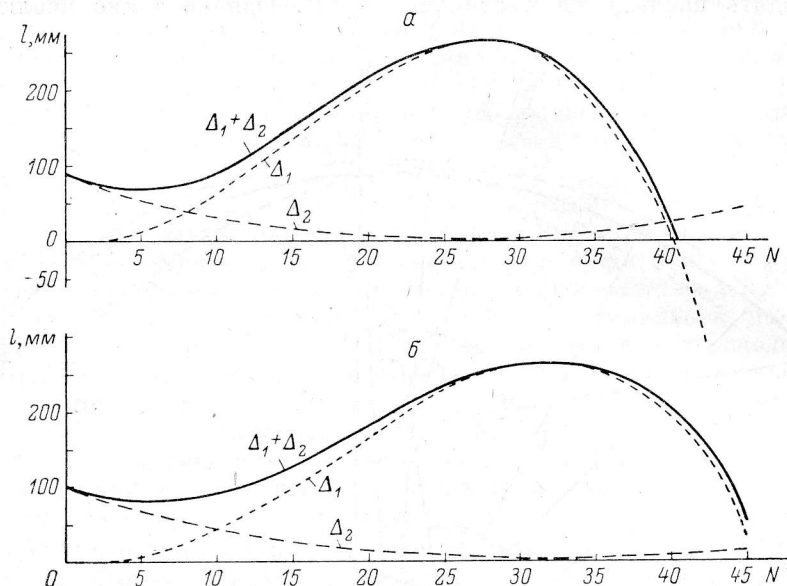


Рис. 6. Радиальные смещения отражающих секций БПР в зависимости от их номера N , считая от плоскости симметрии.

и 3 — $\Delta_1(\varphi)$, — нигде не будет превосходить максимального радиального смещения $\Delta_1(\varphi_1) < l$, допускаемого механизмами перемещения. Этот вывод подтверждает ход кривых Δ_1 , Δ_2 и $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ для высот $h = 38^\circ$ и $53^\circ 30'$, представленных на рис. 6.* Кривые Δ_1 и Δ_2 рассчитывались для радиуса исходных окружностей [2]

$$r = R \sin \alpha_1 (1 + \cos h) / \{ \sin \alpha_1 + [(1 + A) \sin \beta + \sin \alpha_1] \cos h \}, \quad (2)$$

который определялся из треугольника $\Pi_1 \Pi_2 F$ (рис. 5) с учетом значения фокусного расстояния (см. [2])

$$\rho = r (1 - A \cos h) / (1 + \cos h), \quad (3)$$

где $A = \sqrt{2l/R - l^2/R^2}$.

При этом расстояние от центра Π_1 до фокуса F

$$f = r (1 + A) \cos h \cdot \sin (\alpha_1 + \beta) / \sin \alpha_1 (1 + \cos h). \quad (4)$$

Радиальное смещение

$$\Delta_2(\alpha) = R - (R - r) \cos (\alpha_1 - \alpha) - \sqrt{r^2 \cos^2 (\alpha_1 - \alpha) + R (2r - R) \sin^2 (\alpha_1 - \alpha)} = R - L, \quad (5)$$

* Направления смещений Δ_1 и Δ_2 при малых углах β практически совпадают.

где L определяется из треугольника $Ц_1Ц_2M$ (рис. 5). Максимальное значение $\Delta_2(O)$ слабо зависит от места касания окружностей, т. е. от угла α_1 , так как с увеличением α_1 растёт радиус r .

Азимутальный поворот отражающих секций $\gamma = \gamma_1(\varphi) + \gamma_2(\alpha)$ равен сумме углов поворота $\gamma_1(\varphi)$ от исходной окружности к эллипсу и от начальной окружности к исходной:

$$\gamma_2(\alpha) = \arcsin(R/r - 1) \sin(\alpha_1 - \alpha). \quad (6)$$

Максимальное значение $\gamma_2(0) \ll 1^\circ$, так что углы $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ лежат в пределах $\pm 3^\circ$, обеспечиваемых механизмом азимутального поворота.

Предлагаемый метод будем считать применимым, если координата δ определяется не грубее, чем в 5 раз координаты α , т. е. при $\operatorname{tg} \varepsilon \geq 0.2$ и $\varepsilon \geq 11^\circ 5'$ — см. (1) и рис. 4. При этом условии центральный угол проекций дуг 2 и 3 в плоскости раскрыва $\varepsilon_0 = 2\varepsilon \geq 23^\circ$. Угол ε_0 связан с высотой h и углом облучения 2ψ [4] выражением

$$\sin \varepsilon_0 = \sin h \sin \psi / (1 + \cos h \cos \psi). \quad (7)$$

Так как на БПР угол облучения $2\psi \approx 120^\circ$ и по условию $\varepsilon_0 \geq 23^\circ$, то минимальная высота $h = 38^\circ$, что для широты Ленинграда соответствует склонению Солнца $\delta_\odot \approx +8^\circ$. При максимальном склонении $\delta_\odot = +23^\circ 5'$, $h \approx 53^\circ 5'$, $\varepsilon_0 = 32^\circ$ и $\operatorname{tg} \varepsilon = \operatorname{tg} 16^\circ = 0.29$, что позволяет определить координату δ приблизительно в три раза грубее, чем координату α .

Угловая ширина ножа парциальной диаграммы направленности по узкому размеру

$$\theta_r = \lambda/D = \lambda/2R \sin(\alpha_0/2), \quad (8)$$

где D — ширина хорды отражающего сектора. Угловая ширина парциальной диаграммы направленности по большему размеру

$$\theta_B = \lambda/(H + d) = \lambda [H_0 \cos h/2 + P(1 - \cos \varepsilon)/\sin h]^{-1}, \quad (9)$$

где H_0 — вертикальный размер отражающей секции, d — стрелка дуги в раскрыве, P — фокальный параметр [2, 4]. При $h = 53^\circ 5'$, $\varepsilon = 16^\circ$, $P = r(1 - A \cos h)$ и $\lambda = 6$ см $\theta_r \approx 3'$ и $\theta_B \approx 28'.5$.

Таким образом, при выбранной геометрии отражающей поверхности механизмы БПР не ограничивают возможности образования двухлучевой диаграммы направленности для изучения Солнца, и наблюдения таким методом в некоторых случаях могут представить интерес.

Литература

1. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Приборы и техника эксперимента, № 2, 19, 1959.
2. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
3. С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 3, 1972.
4. Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. Г. Кузнецов, Г. В. Кузнецов, С. Э. Хайкин, Радиотехника и электроника, № 12, 1947, 1961.
5. В. Ю. Петрунькин, Н. А. Есепкина, Г. В. Кузнецов, Б. Г. Кузнецов, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 172, 160, 1964.
6. Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 188, 13, 1972.