

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВНЕАТМОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.Ф.Сорокин^{1,2}, А.А.Сорокин³, Н.Н.Горобец⁴, О.В.Соколова²

¹*Национальный центр управления и испытаний космических средств*

Национального космического агентства Украины - НЦУИКС, г. Евпатория, 97419, Украина

²*Евпаторийское отделение Крымского факультета Восточноукраинского национального университета
им. В. Даля, ул. Кирова 54, г. Евпатория, 97404, Украина*

www.vni.crimea.edu

³*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,*

пр-т Вернадского, 4, г. Симферополь, 95007, Украина

⁴*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина*

E-mail: Nikolay.N.Gorobets@t.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 17 октября 2008г.

Предложено создание импульсного радиолокатора на основе радиотехнических систем Национального центра управления и испытания космических средств Украины для прогноза астероидной опасности, каталогизации космического мусора, исследования солнечной короны, околосолнечной и межпланетной плазмы, а также для радиоастрономических исследований дальнего космоса. Показано, что при использовании крупногабаритных антенн АДУ-1000 и П-400 такой радиолокатор при длине волны ~ 30 см на высотах ~ 10⁵ м обнаруживает объекты с минимальными размерами ~ 0,7 см. На диске Солнца пространственное разрешение ~ 10³ км.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиолокация, антенна, микроволны, космический мусор

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальны следующие приоритетные направления создания новых и совершенствования существующих радиолокационных комплексов для внеатмосферных (сверхдальних) исследований:

1. Исследования по прогнозу астероидной опасности (в ближайшее время ожидаются близкие прохождения астероидов, в том числе крупного астероида между Землей и Луной, кроме того, практически не исследована дневная сторона неба, недоступная наблюдениям оптическими приборами).
2. Каталогизация космического мусора (к настоящему времени уже имеется несколько случаев потери космических аппаратов в столкновениях с антропогенными космическими объектами).
3. Исследования солнечной короны, околосолнечной и межпланетной плазмы с целью создания прогностической модели космической погоды.
4. Радиоастрономические исследования дальнего космоса.

Эти задачи могут быть успешно и оперативно решены на основе радиотехнических систем Национального центра управления и испытания космических средств Украины (г. Евпатория, Крым).

В настоящей статье основное внимание уделено исследованию возможности создания импульсного радиолокатора на основе антенных комплексов П-400 (передающая антенна) и АДУ-1000 (бывшая передающая антенна, дооснащаемая приемной и регистрирующей аппаратурой), адекватных по использованию мощности и угловому разрешению поставленной задаче. Приведены некоторые технические решения, минимизирующие затраты на переоснащение комплексов как за счет использования имеющегося оборудования, так и за счет применения оригинальных методик регистрации параметров орбиты космических объектов в одном прохождении. Показано, что такая радиолиния обеспечивает надежную регистрацию космических объектов на околоземных орбитах и в дальнем космосе, а используемый частотный диапазон наиболее представлен в радиоизлучении Солнца, оптимален для построения трехмерных радиоизображений Солнца и исследований околосолнечной плазмы.

Украина, как одна из немногих космических держав мира обладает мощным наземным комплексом, существенная часть радиотехнического сектора которого размещена в Евпатории. Так, из

менее чем 20-ти крупногабаритных полноповоротных антенн, имеющих в мире, четыре расположены на территории НЦУИКС: три АДУ-1000 (геометрическая площадь полотна $\sim 2000 \text{ м}^2$) и РТ-70 (геометрическая площадь полотна $\sim 5000 \text{ м}^2$). Имеются и полноповоротные антенны среднего звена - два антенных комплекса П-400 (площадь полотна 1000 м^2). Особую ценность этим комплексам придает то, что РТ-70 и П-400 оснащены мощнейшими в Европе передатчиками. Спрос (в том числе и коммерческий) на антенное время подобных комплексов возрастает и в настоящей статье обращено внимание на возможность создания на основе АДУ-1000 (приемная антенна) и П-400 (излучающая антенна) импульсного радиолокатора без особых капитальных вложений. Эти комплексы имеют совпадающие по частоте антенно-фидерные тракты, а также адекватные задаче угловые разрешения. Экспериментальное исследование имеющихся в НЦУИКС приемно-регистрирующих устройств показало возможность включения их в состав радиометра для АДУ - 1000. Ниже рассмотрены наиболее актуальные направления использования такого локатора.

КАТАЛОГИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА, ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОГНОЗУ АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

Ежегодно на околоземные орбиты выводят десятки объектов, возвращение на Землю которых не предусмотрено. Уже сейчас такие объекты представляют серьезную угрозу (МКС примерно раз в месяц совершает маневры, что может привести к столкновению). Актуальность фиксирования и отслеживания их перемещений будет возрастать, что видно из рис. 1. Кроме того, после вывода спутников из эксплуатации (когда их положение перестают корректировать) их орбиты начинают эволюционировать по законам небесной механики. Для геостационарных спутников плоскость орбиты прецессирует с периодом 52 года и амплитудой $\sim 15^\circ$ и именно на наше время приходится сближение плоскости орбит «пассивных» спутников с геостационарной орбитой. Относительные скорости таких объектов около $\sim 10^4 \text{ м/с}$ и столкновения даже с микрообъектами вызовет катастрофические последствия.

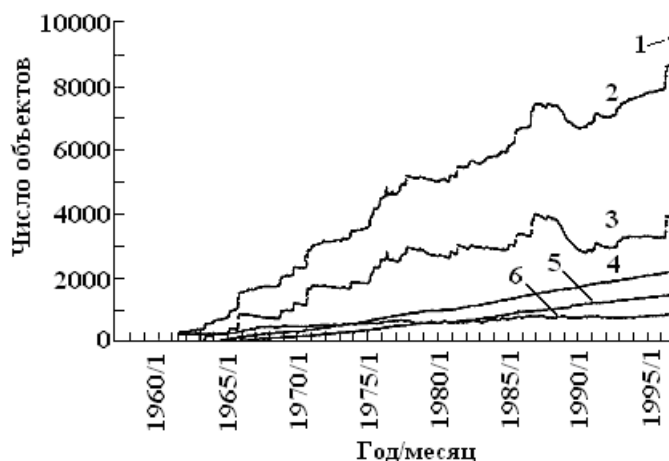


Рис. 1. Увеличение содержания мусора в околоземном космическом пространстве
 1 - общее число объектов, включая не занесенные в официальные каталоги; 2 - общее число объектов, занесенных в каталоги; 3 - фрагменты космического мусора; 4 - космические аппараты; 5 - верхние ступени ракет; 6 - эксплуатационный мусор (Технический доклад о космическом мусоре, подготовленный научно-техническим подкомитетом Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях. Нью-Йорк, 1999)

Всего службами контроля космического пространства на сегодня зафиксировано и отслеживается более 10^4 объектов. Это, в основном, крупные тела размером более 10 см, которые фиксируются оптическими методами. На рис. 2 показана заполненность околоземного пространства по состоянию на 1995 г. Число объектов размером 1 – 10см оценивается статистически (примерно 10^5), поскольку они не регистрируются ни телескопами, ни малоразмерными радарам.

Как видно из рис. 2, выделяются две зоны концентрации космического мусора: первая на высотах 700-1500 км и вторая в районе геостационарной орбиты $\sim 35000 \text{ км}$. Наиболее сложно проводить регистрацию микрообъектов в ближней зоне, так как крупногабаритные антенны не успевают отслеживать перемещение объектов по небосклону, а чувствительности малых антенн недостаточны.

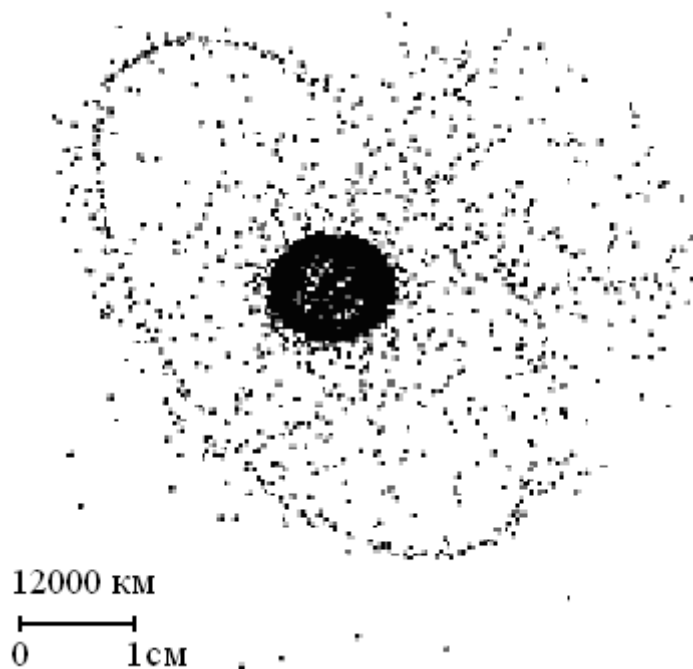


Рис. 2. Пространственное распределение космического мусора в непосредственной близости от Земли (данные Научной корпорации КАМАН, США, 1995)
Видны два пояса уплотнения космического мусора: один на высотах 850-1200 км над поверхностью Земли, другой на высоте около 38500 км

Действительно, мощность отраженного от объекта радиуса r_0 сигнала, принимаемого антенной с эффективной площадью S_f :

$$P = \rho P_0 S S_f r_0^2 / 2 \lambda^2 R_0^4 \pi^2,$$

где ρ - коэффициент отражения (обычно принимается 0,1), S - эффективная площадь излучающей антенны, R_0 - расстояние до объекта, P_0 - излучаемая мощность, λ - длина волны.

Мощность шума, флуктуации которого определяют минимально обнаружимый сигнал:

$$P_{ш} = 4kT\Delta f.$$

Здесь k - постоянная Больцмана, T - эффективная температура приемной системы, Δf - полоса пропускания приемного тракта.

Обычно применяется накопление (усреднение) сигнала за время t , соответственно флуктуации мощности шума:

$$\Delta P_{ш} = 4kT (\Delta f/t)^{0,5}.$$

Принимая достаточным для устойчивого обнаружения отраженного сигнала отношение $P/\Delta P_{ш}=3$, для рассматриваемой радиолинии эффективные площади: $S(\Pi-400) = 400 \text{ м}^2$, $S_1(\text{АДУ}-1000) = 1000 \text{ м}^2$, $T = 300\text{К}$, $\Delta f = 10^4 \text{ Гц}$, $P = 10^5 \text{ Вт}$ получаем:

$$r_0 = 10^{-14} \cdot R_0^2 \cdot t^{\frac{1}{4}} \text{ (м)}. \quad (1)$$

Для области управляемых полетов $R_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ м}$ (именно на этих высотах наиболее актуальна регистрация космического мусора) наименьший размер частиц, фиксируемый предлагаемой радиолинией, $r_0 = 0,7 \text{ см}$. Если принять время накопления равным удвоенному времени прохождения сигнала до объекта, то

$$r_0 = 10^{-14} \cdot R_0^{1,75} \cdot c^{0,25} \text{ (м)}.$$

Соответственно, для геостационарных орбит $R_0 = 3,5 \cdot 10^7 \text{ м}$, $t = 0,2 \text{ с}$, $r_0 = 5 \text{ м}$, что удовлетворяет условиям задачи каталогизации объектов космического мусора. Естественно, для малых антенн эти цифры увеличиваются как минимум на два порядка. В то же время, по механическим ограничениям скорости сканирования недостаточны для сопровождения низколетающих объектов с целью измерения навигационных параметров.

В [1-3] разработаны методики определения параметров траекторий космических объектов, позволяющие проводить такие измерения за один пролет через диаграмму направленности антенн. В

этих методиках предполагается применение трех каналов регистрации, диаграммы направленности которых разнесены в картинной плоскости. Особо жесткие требования в этих методиках предъявляются к идентичности каналов регистрации. Так как в предполагаемой радиолинии регистрирующая антенна АДУ-1000 представляет собой восьмизеркальную систему, это требование достаточно просто удовлетворить введением электронного управления лучом (рис. 3).

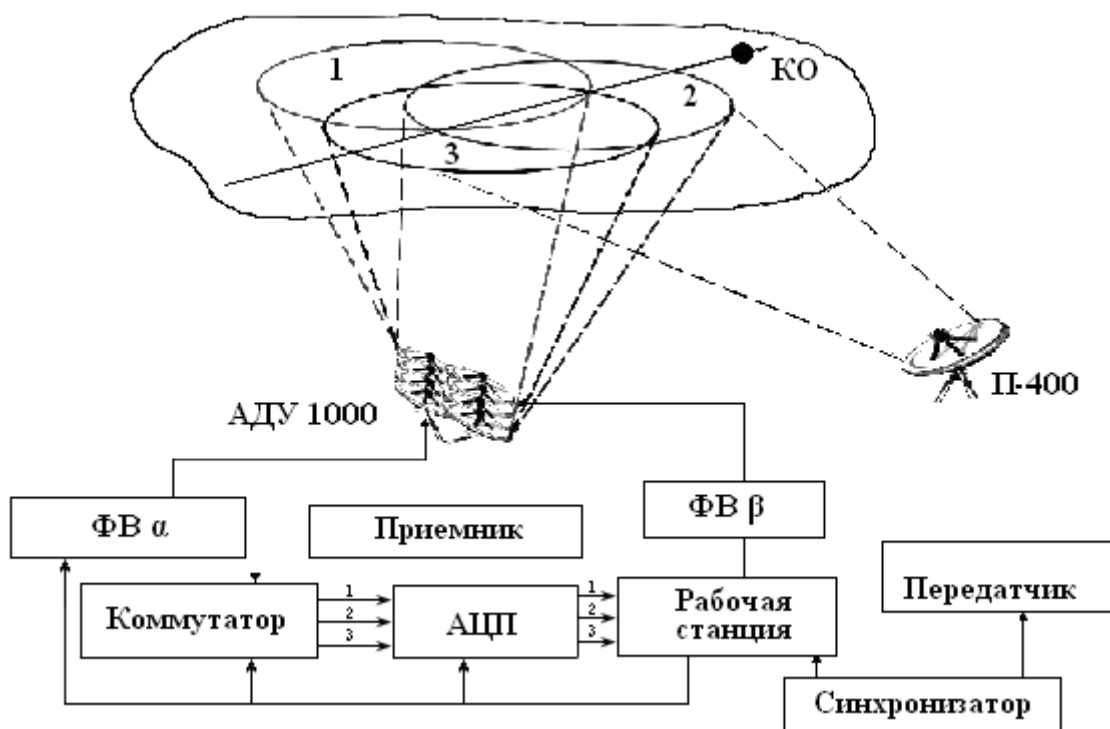


Рис.3. Схема измерения параметров траектории космического объекта при электронном управлении радиолучом

В этом случае используется один радиометр, а дискретные перемещения радиооси в три положения осуществляется скачкообразными изменениями фазы при сложении сигналов групп горизонтальных и вертикальных зеркал антенн. В такой схеме регистрации несколько падает разрешающая способность из-за уменьшения времени накопления сигнала. Это ухудшение можно компенсировать, используя охлаждение малошумящего усилителя, разработанного для радиометра АДУ-1000.

В рамках таких исследований возможно проведение поиска астероидов на дневной стороне неба. По некоторым оценкам, в недоступном для оптики телесном угле возле Солнца может находиться большое количество достаточно крупных естественных объектов, часть из которых может иметь орбиты, сближающиеся с земной.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА И ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Исследования по проблеме солнечно – земных связей являются одной из задач, решаемых в рамках международной кооперации и имеющих как фундаментальный, так реальный практический интерес. Ранее в [4] была показана недостаточность ряда чисел Вольфа как критерия солнечной активности. Процессы, происходящие в активных областях на Солнце, проявляются в геопроцессах тогда, когда объект энергомассопереноса - солнечный ветер, быстрые частицы движутся по траекториям, пересекающим орбиту Земли или проецирующимся на нее. Существенную роль в обнаружении такой направленности могут сыграть радиолокационные методы. Уже в первых экспериментах Джонса по локации Солнца в метровом диапазоне длин волн была обнаружена быстрая перемена размера его радиоизображения, показывающая эффективность такого метода исследования околосолнечной плазмы. К сожалению, такие наблюдения проводились эпизодически, что не позволило набрать статистику для выявления корреляций с собственно процессами на Солнце и с их геопроявлениями.

Существенное увеличение информативности подобных экспериментов следует ожидать в дециметровом диапазоне, в котором работает предлагаемая система. Концентрация плазмы, соответствующая частоте отсечки $f_p = 8,98 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{n}$ ($n \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$) зондирующего луча, характерна для потоков из корональных дыр и протуберанцев – наиболее типичных проявлений активных областей Солнца (f_p выражается в Гц, n в см^{-3}). Так как коэффициент отражения зондирующего луча от плазмы пропорционален четвертой степени плазменной частоты (f_p), область отражения имеет малые размеры, что обеспечивает высокое разрешение вдоль луча. Действительно, для малых частот соударений $f_{st} = (n\sigma v)^{-1} \ll f_p$ (что выполняется для околосолнечной плазмы с большим запасом) и $f_p/f < 0,5$ показатель преломления $\mu \approx 1 - \frac{f_p^2}{2f^2}$. Соответственно коэффициент отражения: $\rho = \frac{(1-\mu)^2}{(1+\mu)^2}$, а глубина

проникновения волны в плазму: $\delta = \frac{\lambda}{2\pi x}$, где $x = \frac{f_{st} f_p^2}{2f^3} \left(1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \right)^{-1/2}$. Для $(f_{st}/f) \sim 10^{-3}$ и

$\lambda = 0,39$ м, пространственное разрешение вдоль луча: $\delta = 10^4 \cdot \lambda = 0,39 \cdot 10^4$ м, при коэффициенте отражения $\rho = 0,4$. На рис. 4 показан пример, иллюстрирующий это положение [5]

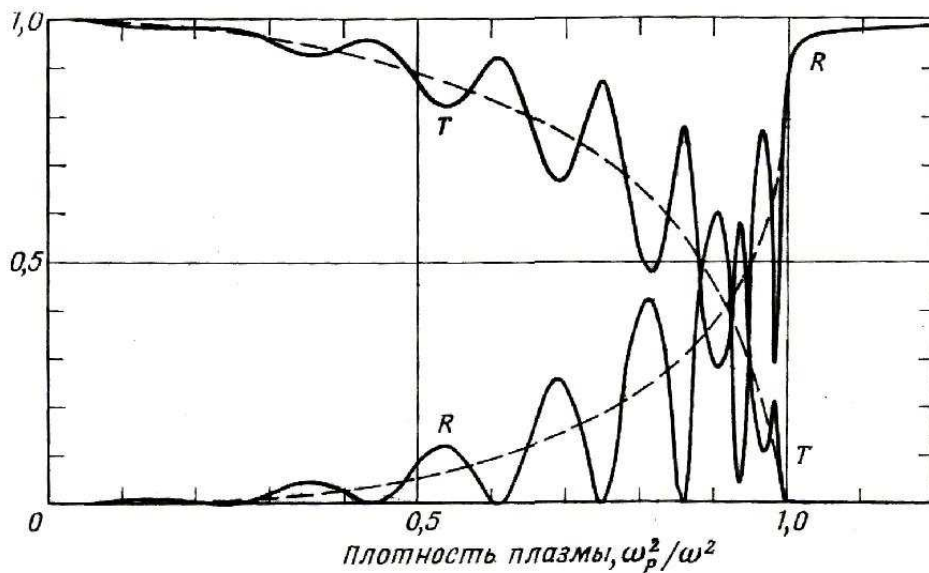


Рис.4. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания волны для плазменного слоя, толщина которого равна учетверенной длине волны

Пространственное разрешение в картинной плоскости гораздо хуже (рис 5): $(\Delta x, \Delta y) \sim K\lambda R_0/2R_A$, где R_A – радиус приемной антенны, K – коэффициент, определяющий точность решения некорректной задачи восстановления изображения, полученного детектором с известной аппаратной функцией (диаграммой направленности).

Для АДУ-1000 при $K = 10^{-3}$ и $R_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ м, $\Delta x(2R_A = 64 \text{ м}) \sim 10^3$ км, $\Delta y(2R_A = 32 \text{ м}) \sim 2 \cdot 10^3$ км. При таком разрешении возможно наблюдение развития корональных дыр и протуберанцев, а также плазматидов, распространяющихся в околосолнечном пространстве. Величина коэффициента K определяется возможностью выделения сигнала, создаваемого активной областью на фоне окружающей плазмы и получена для соотношения $P/\Delta P_w = 10$. В соответствии с формулой (1), при наблюдении регистрируемого объекта вне Солнца $r_0 = 3 \cdot 10^2$ км (время наблюдения $6 \cdot 10^2 \text{ с}) \ll (\Delta x, \Delta y)$, что показывает перспективность использования предлагаемого радиолокатора в наблюдениях Солнца. При соответствующем дооснащении радиометра АДУ-1000 дальномерной аппаратурой, использование радиолинии АДУ-1000 – П-400 позволяет создавать трехмерные изображения пространственного профиля $n_{кр}$ в околосолнечном пространстве и его временного изменения, что поможет раскрыть механизмы явлений, происходящих в околосолнечной плазме.

Оригинальность конструкции АДУ-1000 позволяет на ее основе без значительных капитальных затрат смонтировать девятиканальный радиоспектрометр. Для этого достаточно ввести в соединительный тракт каждого отдельного зеркала (до моста сложения) направленные ответвители. Сигнал с каждого канала коммутируется на вход одного приемного устройства попеременно, что обеспечит идентичность каналов. Полоса частот, охватываемая таким спектрометром, равная 500 МГц – 0,9 ГГц (в соответствии с характеристиками АДУ-1000), весьма представительна в излучении Солнца, радиогалактик и квазаров. Изучение характеристик радиоизлучения на близких частотах позволит существенно расширить наши представления о структуре изучаемых объектов.

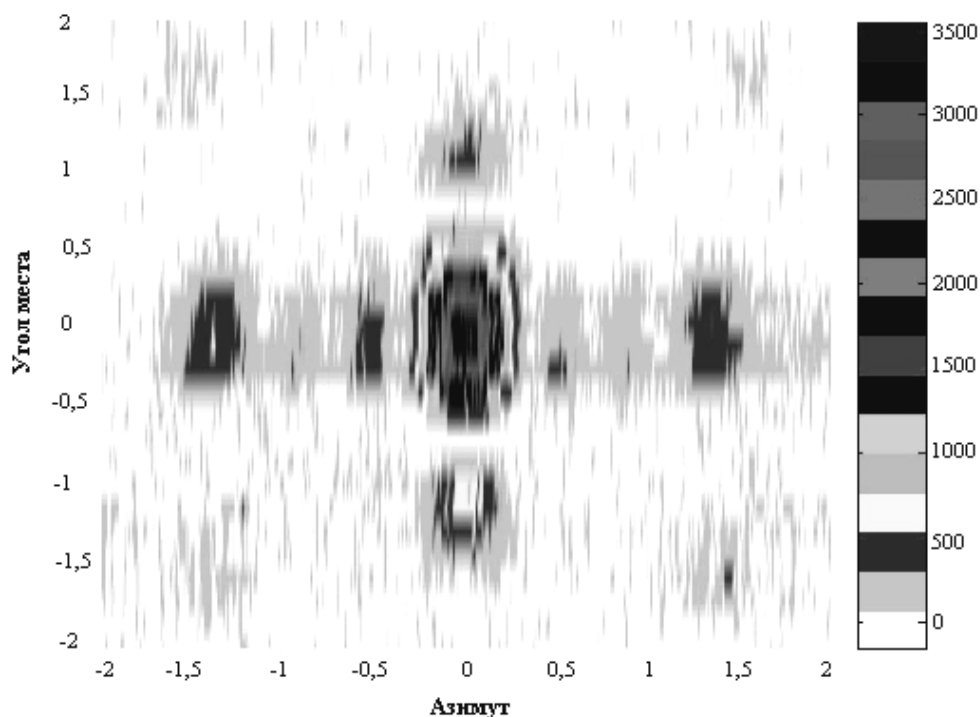


Рис. 5. Диаграмма направленности АДУ-1000, измеренная по радиоисточнику PSR0833-45

ВЫВОДЫ

Проведенное рассмотрение диверсификации радиолокационных комплексов показывает их высокую эффективность. Развитие элементной базы и компьютерных технологий, их удешевление позволяет получить существенный экономический эффект используя строительные технологические конструкции ныне законсервированных комплексов антенных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власенко В. П. Цифровая обработка сигналов в прецизионном методе измерения текущих навигационных параметров космических объектов. 3-rd International Conference and Exhibition on Digital Signal Processing and its Applications, Proceedings-1, Moscow, 2000
2. Цюх А.М. Многоканальная приемная система для точного определения угловых координат объектов в радиодиапазоне. III Міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос": Збірник тез. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2001, с.124
3. Власенко В.П., Сорокин А.Ф. Способ прецизионного измерения координат и вектора скорости отражающего объекта. Патент Украины №42195А от 15.10.2001. Бюл.№9. Патент РФ №2254588,20.06.2005
4. Власенко В.П., Селиванов Ю.А., Сорокин А.Ф., Цюх А.М. Синхронные наблюдения радиоизлучения Солнца на разных длинах волн. // Космічна наука і технологія. 2003р. Т 9. № 5/6. с. 158-164
5. Уортон Ч. Микроволновая диагностика. В сб. Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967, с. 408