

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГАЦИИ ЗА СЧЕТ УЧЕТА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИГНАЛОВ

В.Б. Бакеев, заместитель директора НТЦ № 26 РСЧН филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; bwb@soniir.ru

А.П. Трофимов, старший научный сотрудник НИЛ 21 НО-2 филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; tap@soniir.ru

Д.В. Филиппов, начальник НО-2 филиала ФГУП НИИР – СОНИИР, к.т.н.; fdv@soniir.ru

Рассматривается проблема реализации процессов пеленгации методами сверхразрешения при использовании горизонтальных вибраторов, принимающих сигналы как азимутальной, так и меридиональной поляризации. Предлагается комплексный алгоритм, обеспечивающий оценивание угловых координат с учетом поляризационных характеристик принимаемых сигналов.

Ключевые слова: пеленгация, методы сверхразрешения, поляризационные свойства сигналов.

Введение. В последнее время при решении задач определения угловых координат источников радиоизлучения в различных частотных диапазонах все чаще применяются известные способы радиопеленгации, основанные на методах сверхразрешения. Главное достоинство таких методов заключается в возможности различения источников излучения с малым угловым разнесом (работают в одной или перекрывающихся частотных полосах) антенными системами, которые по своим характеристикам не удовлетворяют критерию Рэлея [1]. Основные проблемы определения угловых координат источников радиоизлучения с помощью данных методов проработаны сегодня в достаточной для практической реализации степени. Известные трудности их реализации, связанные со значительными вычислительными затратами при работе в реальном времени, успешно решаются благодаря бурному росту производительности специальной вычислительной техники [2, 3].

Между тем отсутствие учета поляризационных характеристик сигналов при определении угловых координат методами сверхразрешения может привести к существенному снижению эффективности работы указанных методов. Однако данная проблема в литературе практически не освещена, по крайней мере, публикации на этот счет авторам не известны.

Следует отметить, что наиболее остро указанная проблема может проявляться при пеленгации источников радиоизлучения, находящихся на воздушных судах или космических аппаратах, а также при приеме сигналов, отраженных от ионосферы. Дело в том, что для пеленгации таких источников излучений должны быть применены антенные системы на основе горизонтальных вибраторов. Вертикальный вибратор, как известно, имеет ноль диаграммы направленности (ДН) в зенит.

Сложность заключается в том, что горизонтальный вибратор принимает сигналы как азимутальной, так меридиональной поляризации. Между тем реально измеряется и далее обрабатывается только суперпозиция этих сигналов [4]. Однако этой паре сигналов должна соответствовать уже не скалярная, как при решении классической задачи, а векторная ДН. Поэтому принятая суперпозиция сигналов должна быть разделена на указанные компоненты вектора.

Описание алгоритма. Для решения поставленной задачи была выполнена разработка комплексного алгоритма, обеспечивающего оценивание угловых координат с учетом поляризационных характеристик принимаемого сигнала в рамках единого процесса обработки парциальных сигналов антенной решетки.

Пусть имеем антенную решетку, состоящую из системы горизонтальных вибраторов. Как было сказано выше, сигнал на выходе тракта каждого горизонтального вибратора представляет сумму двух сигналов — меридиональной и азимутальной поляризации. Следовательно, корреляционную матрицу \mathbf{R} сигналов, принимаемых на горизонтальные вибраторы, можно записать следующим образом:

$$\mathbf{R} = \mathbf{Y}\mathbf{Y}^H = \mathbf{Y}_\theta \mathbf{Y}_\theta^H + \mathbf{Y}_\varphi \mathbf{Y}_\varphi^H, \quad (1)$$

где \mathbf{Y}_θ — вектор сигналов, принятых антенной решеткой и имеющих меридиональную поляризацию принимаемого сигнала; \mathbf{Y}_φ — вектор сигналов, принятых антенной решеткой и имеющих азимутальную поляризацию принимаемого сигнала; символ H означает эрмитово сопряжение. Сигналы, принимаемые элементами антенной решетки от одного источника, являются коррелированными.

Поляризационные свойства сигнала (электромагнитной волны) описываются двумя параметрами — коэффициентом эллиптичности и углом наклона большой оси поляризационного эллипса. Следует отметить одну важную особенность — при коэффициенте эллиптичности, равном единице, угол наклона не определен и, следовательно, может быть принят произвольным. Кроме того, наряду с коэффициентом эллиптичности и углом наклона большой оси поляризационного эллипса, необходимо учитывать и направление вращения плоскости поляризации. При этом возникает еще один поляризационный параметр (по сути, пятая искомая величина). Существенным обстоятельством является то, что данный параметр представляет собой дискретную величину, принимающую два значения, что крайне затрудняет его формализацию как независимо варьируемой переменной.

Известно, что определение угловых координат в рамках алгоритмов сверхразрешения при приеме только одной поляризации решается путем построения пеленгационного рельефа $P_{\varphi,\theta}$ в зависимости от возможных направлений прихода сигнала источника излучения, т.е. пеленгационный рельеф определяется как функция двух переменных — угловых координат φ (азимут) и θ (полярный угол). При этом используется выражение:

$$P_{\varphi,\theta} = \frac{1}{\mathbf{v}_{\varphi,\theta}^H \mathbf{\Pi} \mathbf{v}_{\varphi,\theta}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{\Pi}$ — матрица-проектор на шумовое пространство; $\mathbf{v}_{\varphi,\theta}$ — вектор гипотеза для соответствующего направления.

Максимумам пеленгационного рельефа (достаточно выраженным) соответствуют источники радиоизлучений. В рамках определения угловых координат с учетом поляризационных характеристик принимаемого сигнала пеленгационный рельеф должен быть определен как функция минимум четырех переменных, т.е.

$$P_{\varphi, \theta, k, \beta} = \frac{1}{\mathbf{V}_{\varphi, \theta, k, \beta}^H \mathbf{\Pi} \mathbf{V}_{\varphi, \theta, k, \beta}}, \quad (3)$$

где $\mathbf{V}_{\varphi, \theta, k, \beta}$ — вектор-гипотеза для соответствующего направления и поляризации; k, β — коэффициент эллиптичности и угол наклона большой оси эллипса (от меридионального орта, взятого с обратным знаком), соответственно. По максимумам пеленгационного рельефа, как и в известной двумерной задаче, вычисляются угловые координаты.

Напряжение в нагрузке вибратора при приеме произвольной поляризации определяется выражением:

$$U_{\Sigma} = k_{\theta} U_{\theta} + k_{\varphi} U_{\varphi}, \quad (4)$$

где U_{θ} и U_{φ} — напряжения в нагрузке в отсутствие азимутально и меридионально поляризованной волны соответственно:

$$k_{\theta} = \cos(\beta) + i(1-k)\sin(\beta) \quad (5)$$

и

$$k_{\varphi} = \sin(\beta) - i(1-k)\cos(\beta) \quad (6)$$

— коэффициенты для соответствующих поляризаций, зависящие от параметров поляризации.

Отметим, что направление вращения плоскости поляризации в (3)–(6) присутствует неявно. Оно определяется знаком коэффициента эллиптичности, который изменяется не в пределах $0 \dots 1$, как принято в теории антенн, а в пределах $-1 \dots 1$. Такой подход является одной из особенностей предлагаемого алгоритма; достигаемое при этом преимущество — отсутствие дополнительных вычислительных процедур, связанных с организацией сканирования по данному параметру.

Учет поляризационных характеристик при расчете пеленгационного рельефа (т.е. расчет его как функции четырех переменных) приводит к значительному увеличению вычислительных затрат. Решение задачи предполагает использование высокопроизводительной вычислительной

техники, в частности, графических процессоров [2, 5]. Вместе с тем, в алгоритме предложены и реализованы дополнительные меры по сокращению объемов вычислительной работы. К таким мерам относится закругление расчетов при сканировании по β при $|k| \rightarrow 1$, т.е. в ситуациях, когда поляризация близка к круговой.

Результаты компьютерного моделирования. Предлагаемый алгоритм программно реализован и испытан на компьютерной модели. Проведенные испытания подтвердили его работоспособность и эффективность.

На рис. 1–5 приведены результаты некоторых расчетов применительно к приему на решетку горизонтальных вибраторов. Направление на источник на всех рисунках одинаково: азимут $\varphi = 10^\circ$; полярный угол $\theta = 41^\circ$. Слева на каждом рисунке показана ситуация, соответствующая пеленгации без учета поляризационных характеристик (известный алгоритм пеленгации), справа — с учетом поляризационных характеристик (предлагаемый алгоритм).

На каждом рисунке слева представлены следующие графики:

- двумерный пеленгационный рельеф (по вертикали — полярный угол, по горизонтали — азимут);
- полярный рельеф (сечение поляризационного рельефа при фиксированном истинном азимуте источника);
- азимутальный рельеф (сечение поляризационного рельефа при фиксированном истинном полярном угле источника), без учета поляризационных характеристик.

На каждом рисунке справа показаны аналогичные зависимости с учетом поляризационных характеристик принимаемого сигнала.

Рис. 1–5 отличаются поляризационными характеристиками. Рис. 1 соответствует линейной азимутальной поляризации ($\beta = 90^\circ, k = 0$), полностью согласованной по поляризации с антенной. Оба алгоритма при этих условиях обеспечивают правильный результат пеленгации.

Рис. 2 соответствует линейной меридиональной поляризации ($\beta = 0^\circ, k = 0$), т.е. полному поляризационному несогласованию и представляет собой наихудший случай. Видно, что известный алгоритм при этих условиях вообще не определяет пеленг (максимумы пеленгационного рельефа в нужных точках отсутствуют), в то время как предлагаемый алгоритм по-прежнему обеспечивает правильный результат.

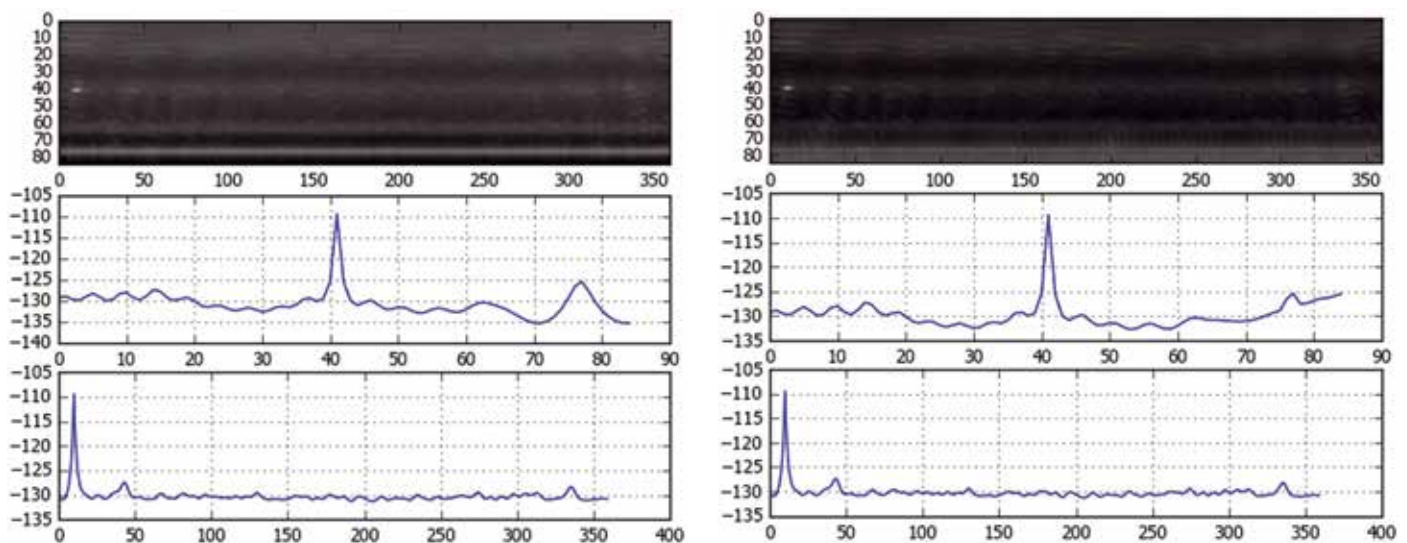


Рис. 1

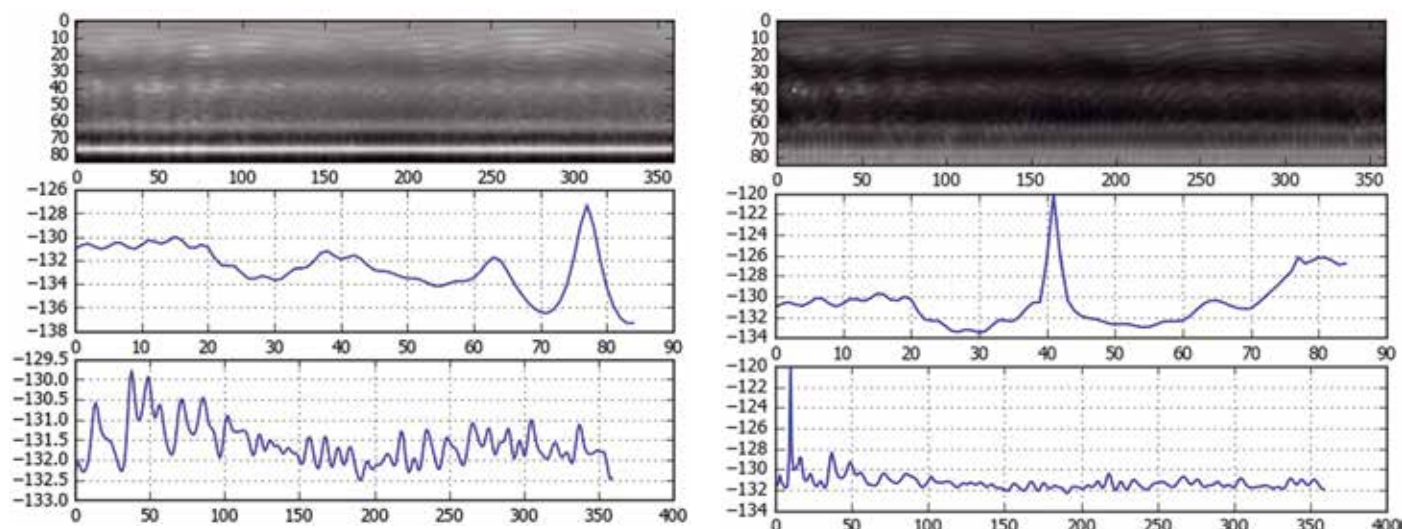


Рис. 2

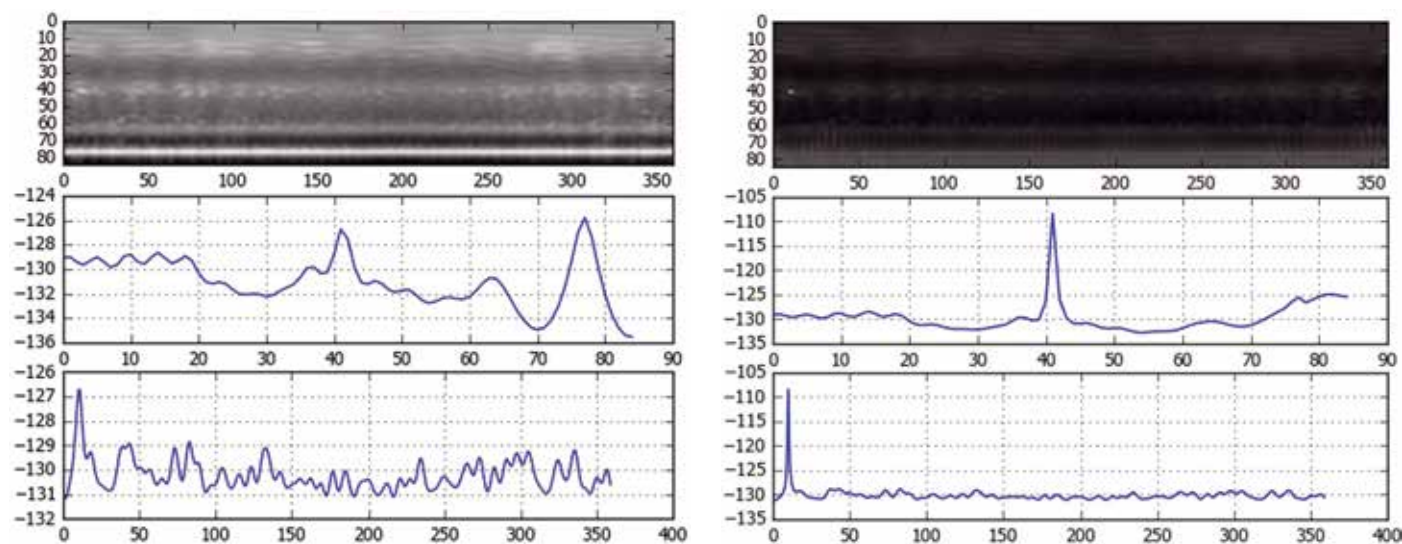


Рис. 3

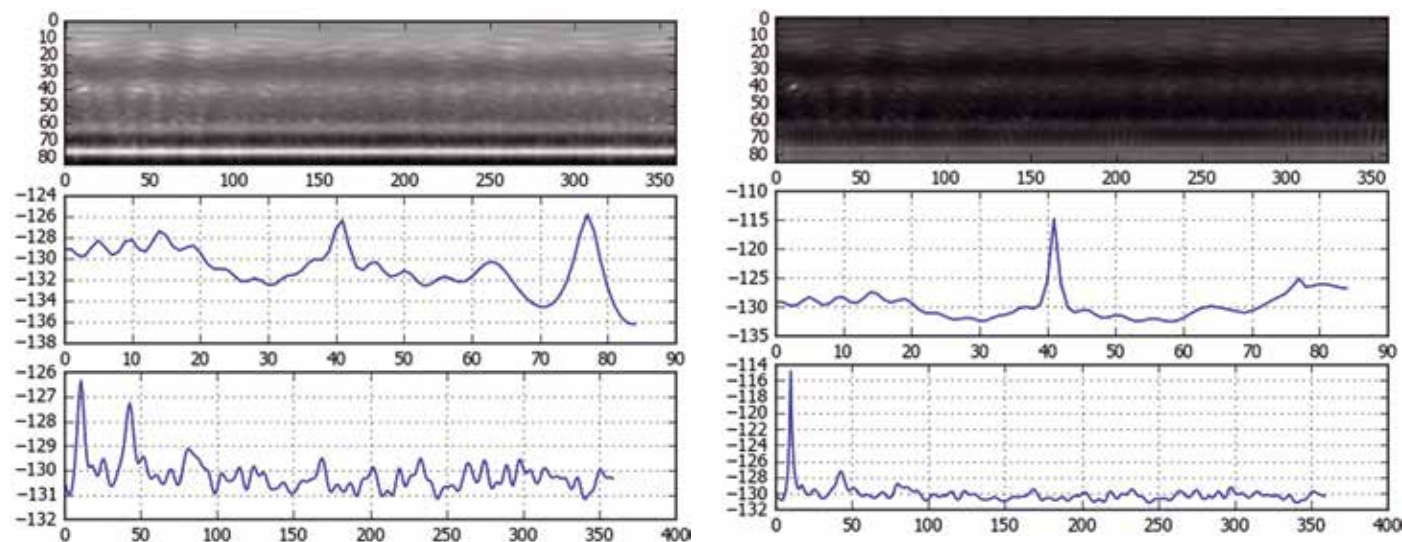


Рис. 4

Рис. 3 соответствует круговой поляризации ($k=1$, параметр β не определен); рис. 4 — линейной наклонной поля-

ризации ($\beta=45^\circ, k=0$); рис. 5 — эллиптической поляризации с наклоном главной оси эллипса на 45° ($\beta=45^\circ, k=0,5$).

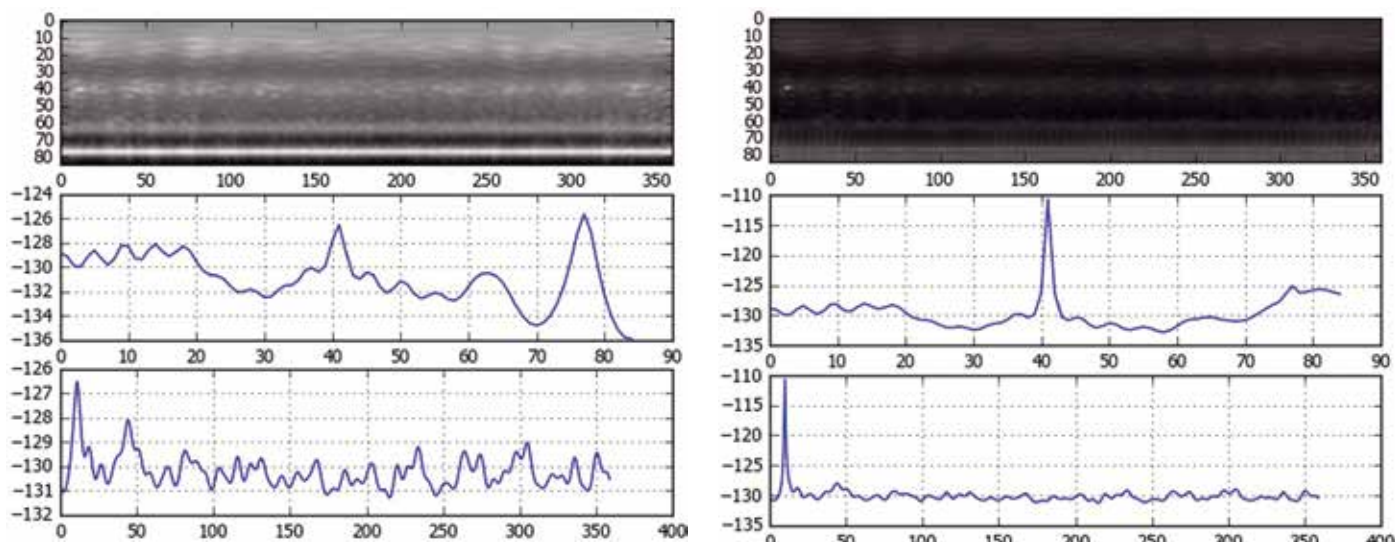


Рис. 5

Рис. 3–5 представляют промежуточные случаи между наилучшим (рис. 1) и наихудшим (рис. 2). Во всех этих случаях предлагаемый алгоритм успешно решает задачу пеленгации. Что же касается известного алгоритма, то, хотя он и формирует максимумы пеленгационного рельефа в нужных точках, они слабо выражены и, главное, имеются побочные максимумы (ложные цели), которые зачастую выражены лучше. Все это означает низкое качество работы пеленгатора (высокая вероятность ложных тревог и т.д.).

Таким образом, можно констатировать, что предлагаемый алгоритм определения угловых координат с учетом поляризационных характеристик сигнала обеспечивает более эффективное решение задач пеленгации относительно известных методов сверхразрешения, не учитывающих поляризационные характеристики сигнала.

Заключение. Большинство антенных систем, предназначенных для радиопеленгации наземных объектов, строятся на основе вертикальных вибраторов. Такие вибраторы (перпендикулярный подстилающей поверхности) обеспечивают прием только меридиональной компоненты вектора напряженности электрического поля, т.е. фильтрацию по поляризации. Это, казалось бы, позволяет использовать скалярные ДН и собственно решать задачу классическими методами. Однако на практике зачастую имеет место паразитный прием кроссполяризации, обусловленный эффектами деполяри-

зации, вызванными влиянием металлических опор и других окружающих предметов. В таких случаях отсутствие учета поляризационных характеристик также может приводить к значительному снижению точности пеленгации, тем больше, чем выше удельный вес паразитной поляризации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ратынский М. В.** Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. — М.: Радио и связь, 2003.
2. **Кольчугин И.Ю., Трофимов А.П.** Алгоритм пеленгации источников радиоизлучений в верхней полусфере системой неподвижных антенных решеток // Труды НИИР. — 2011. — № 1. — С. 29–33.
3. **Бакеев В.Б., Телегин С.С., Трофимов А.П.** Пространственный поиск в системах радиомониторинга космического пространства // Антенны. — 2012. — № 6. — С. 5–11.
4. **Маслов Е.Н., Лучин Д.В., Филиппов Д.В.** XX Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ / Материалы конференции. — Самара, 2013 — С. 187–188.
5. **Кольчугин И.Ю., Трофимов А.П.** Использование графических процессоров при моделировании процессов приема и обработки сигналов в антенных решетках // Радиотехника. — 2012. — № 6. — С. 96–101.

Получено 15.07.15



ВОЗБУДИТЕЛЬ ДКМВ-ДИАПАЗОНА ВКВ-30

Предназначен для работы в составе радиопередающего устройства комплекса технических средств автоматизированной адаптивной радиосвязи в диапазоне ДКМВ (КТС ААРС, см. обложку), а также для самостоятельного применения.

Установка рабочих параметров возбуждителя осуществляется при помощи дистанционного управления по интерфейсам Ethernet или RS-232 от ЭВМ автоматизированного рабочего места либо от удаленного сервера.

Обеспечивает цифровое управление фазой излучаемого радиосигнала. Может использоваться для построения компактных цифровых антенных решеток.

Выполнен по схеме с прямым цифровым синтезом частоты, что позволяет формировать сигнал с высокой спектральной чистотой и поддерживать высокие требования ЭМС.



Филиал ФГУП НИИР – СониИР

443011, Самара, ул. Советской Армии, д. 217. Тел./Факс: +7 (846) 926-07-39, +7 (846) 926-15-11. www.soniir.ru; info@soniir.ru