

## ЦИФРОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ GPS

Системы спутниковой радионавигации (GPS, ГЛО-НАСС) создавались в первую очередь для обеспечения войск и военной техники координатно-временной информацией о расположении и перемещениях возможного противника. Активное внедрение спутниковых навигационных систем в гражданскую жизнь началось около 15 лет назад. За это время система GPS получила распространение во всем мире, а ее приемники-индикаторы стали продуктами массового спроса. Перспективы расширения коммерческого рынка навигационной аппаратуры оказались настолько впечатляющими, что в США аппаратура GPS была модифицирована под гражданские нужды. Был отменен режим селективного доступа, который примерно в 10 раз ухудшал стандартную точность местоопределения, составлявшую 10–20 м. Вместе с тем, при очевидном успехе в гражданском секторе, широко известны серьезные проблемы GPS-технологий в военных приложениях, где системы наведения оружия, использующие GPS, давали многочисленные сбои [1].

Во время операций США и Англии в Ираке, а также "Решительной силы" НАТО в Союзной Республике Югославии обороняющиеся стороны весьма эффективно использовали для борьбы со средствами наведения крылатых ракет и авиации противника постановку помех приемникам GPS-сигналов. Это приводило к самоликвидации крылатых ракет "Томагавк" в полете во время операции "Лиса в пустыне", а также к нештатным полетам тех же ракет по несанкционированным траекториям при боевых действиях НАТО в Югославии. Причина тому – использование в GPS-системе фазоманипулированных (ФМ) сигналов, считавшихся наиболее помехозащищенными. Однако оказалось, что для того, чтобы заглушить сигналы спутниковой GPS, достаточно излучать с Земли немодулированные синусоидальные электромагнитные колебания частоты 1577 МГц (гражданский канал) и 1230 МГц (военный канал). Причем мощность передатчика

В.Слюсар

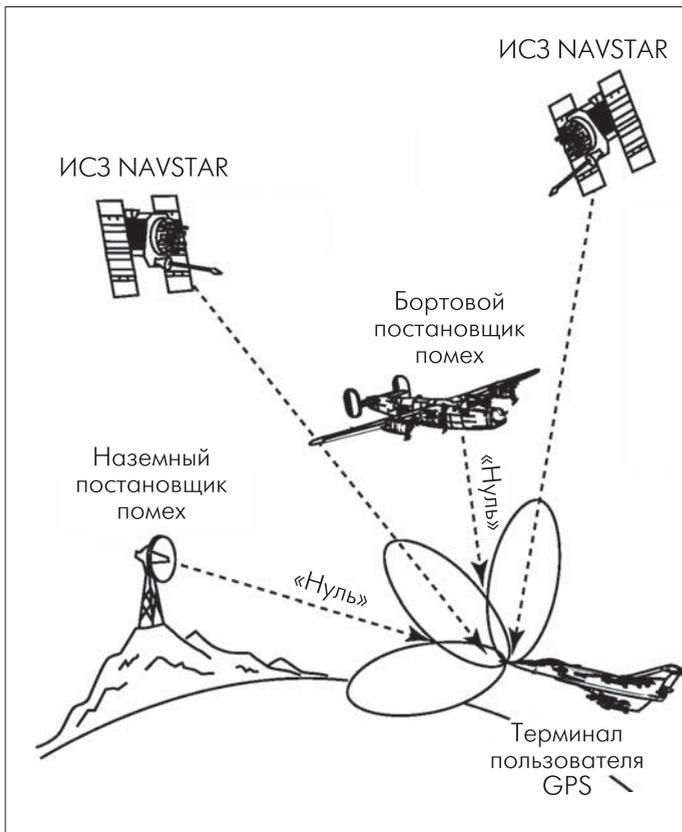
может составлять всего несколько ватт [2], а для подавления гражданского и военного каналов знать коды ФМ-сигналов вовсе не нужно. Из-за сильной зависимости точности наведения от простейших организованных помех в виде расстроенной несущей использование GPS может оказаться невозможным в обоих (гражданском и военном) каналах.

Вот почему сегодня с учетом возможности активного радиопротиводействия эффективность традиционной системы GPS находится под большим вопросом. Как отмечается в работе [2], рано или поздно не только военные, но и гражданские пользователи навигационных приемников почувствуют действие "глушилок". Мощность излучения первого передатчика активных помех массой менее 3 кг, созданного ООО "Авиаконверсия" и продемонстрированного в 1997 году на Международном авиакосмическом салоне в Жуковском, составляла около 2–3 Вт в каждом частотном диапазоне. Его дальность действия достигала 50 км в пределах прямой видимости. В 1999 году в ООО "Авиаконверсия" был освоен серийный выпуск постановщика помех GPS следующего поколения массой 10 кг с мощностью излучения 20 Вт в каждом частотном диапазоне. Дальность действия передатчика достигала 150 км.

Для решения проблемы помехозащиты в США планируется модернизировать системы GPS за счет увеличения мощности передатчиков на спутниках до 800 Вт (сейчас она составляет 50 Вт) и расширения рабочего диапазона частот. Однако, по-видимому, эти меры будут недостаточно эффективными, поскольку одноваттный передатчик по-прежнему сможет подавлять сигналы GPS в радиусе 20 км. Для этого потребуется всего лишь больше элементарных средств радиоэлектронной борьбы. Так, для защиты территории размером 1000×500 км необходимо 1000 постановщиков помех (jammers) стоимостью порядка 200–300 долл. каждый.

Более эффективным представляется применение в приемниках GPS-сигналов малогабаритных адаптивных цифровых антенных решеток (ЦАР) [3, 4]. В числе основных достоинств такого решения специалисты отмечают:

- увеличение отношения сигнал-шум за счет когерентного накопления сигналов по полотну решетки и ориентации

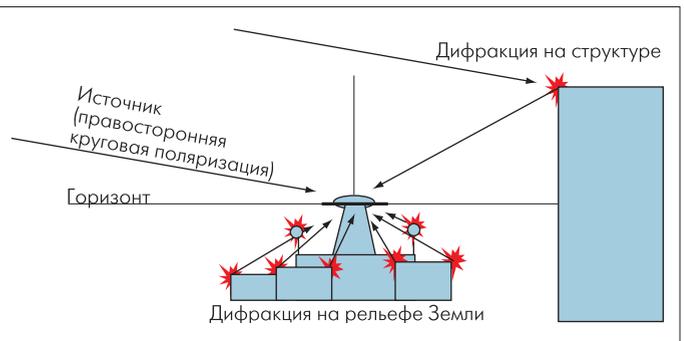


**Рис.1. Формирование "нулей" диаграммы направленности на источник помехи**

максимумов лучей диаграммы направленности приемника GPS непосредственно на спутники созвездия;

- формирование "нулей" диаграммы направленности в направлениях постановщиков помех (рис.1);
- эффективное подавление помех, возникающих за счет многолучевого распространения радиоволн и переотражений от подстилающей поверхности (рис.2);
- измерение параметров спутниковых сигналов с высокой точностью.

Пример такого подхода – GPS-приемник на основе ЦАР, разработанный американской компанией NAVSYS в рамках проекта HAGR (High Gain Advanced GPS Receiver – перспективный GPS-приемник с высоким усилением) [5]. На первом этапе проекта предполагалось создать семи-элементную [6] и 16-элементную цифровые антенные решетки, обслуживаемые цифровой приемной системой на основе шинного интерфейса стандарта CompactPCI (сPCI). Такое число каналов позволяет одновременно работать по созвездию из 12 спутников. При модульной концепции аппаратной реализации алгоритмов обработки сигналов ЦАР [7] с выходов плат многоканальной оцифровки сигналов цифровые отсчеты напряжений поступают на модуль корреляционного акселератора и дальше – на плату хост-процессора. Конечная цель проекта – отработка многоканальной GPS-системы на основе 109-элементной ЦАР (рис.3) [8]. При этом за счет когерентного сложения сиг-

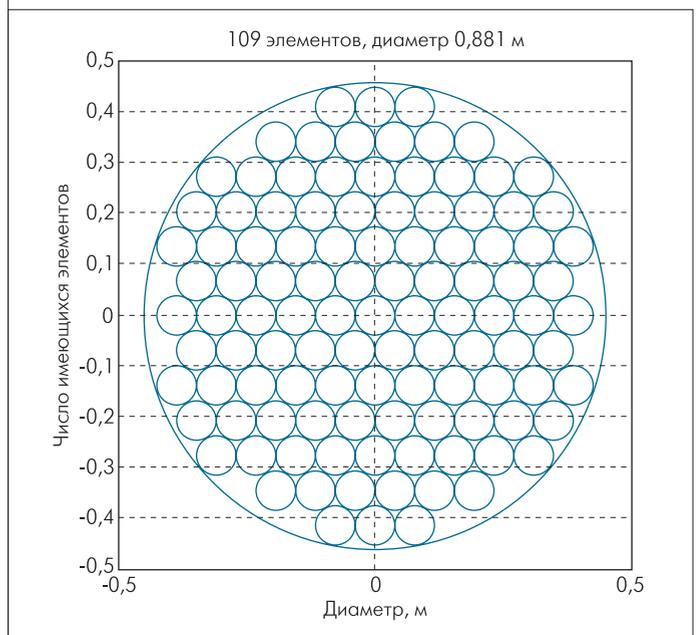


**Рис.2. Многолучевое распространение радиоволн**

налов при цифровом диаграммообразовании обеспечивается дополнительное увеличение отношения сигнал-шум ЦАР на 20 дБ. В общем случае для N антенных элементов это увеличение теоретически определяется выражением  $10 \cdot \log_{10} N$  [9].

Несмотря на большое число антенных элементов, диаметр 109-канальной решетки L1-диапазона (1592–1610 МГц) составляет 1,218 м [10], что позволяет размещать ее на транспортных средствах, в том числе и на самолетах. Специалисты компании NAVSYS в 2005 году провели успешные испытания усеченной версии такой ЦАР с 96 приемными элементами, размещенной на борту самолета [10]. При этом использовались до 14 сPCI-плат формата 6U, которые обеспечивали оцифровку сигналов с выходов восьми антенных элементов с частотой дискретизации до 65 МГц каждый.

Менее громоздким решением является совместно разработанный компаниями NAVSYS и Microsoft прототип бортовой аппаратуры ЦАР, выполненный на основе шинного интерфейса стандарта PC/104-Plus. В нем информация, поступающая от спутникового созвездия и принимаемая восьмизлементной антенной решеткой, обновляется с частотой 10 Гц [11].

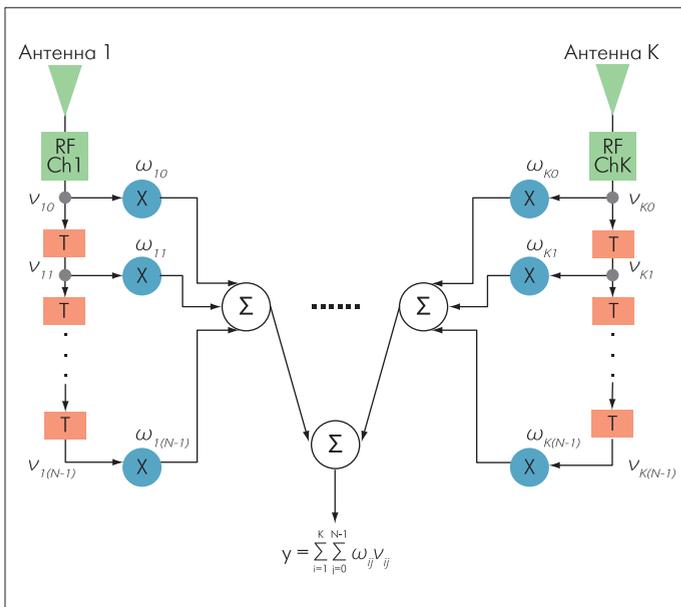


**Рис.3. 109-элементная ЦАР для приема GPS-сигналов [8]**

Согласно данным шведского агентства оборонных исследований [12], применение ЦАР в системе GPS позволило довести уровень подавления одиночных помех до 90–100 дБ, в то время как существующие средства GPS-навигации теряют работоспособность при воздействии одиночного источника помех мощностью всего 4 Вт с расстояния 145 км [13]. При этом уровень подавления помех за счет адаптивного формирования "нулей" в диаграмме направленности ЦАР составляет 40 дБ и более – в зависимости от числа антенных элементов, остальное подавление обеспечивается кодированием сигналов. Аналогичные значения получают и при подавлении переотражений от окружающих предметов [14]. Максимальное число помех, которые могут быть подавлены в ЦАР, равно  $N-1$ , где  $N$  – число антенных элементов ЦАР [9].

Следует отметить, что лучи в GPS-системе с ЦАР могут формироваться в каждом отсчете АЦП до или после корреляционной обработки принятых сигналов (рис.4). Однако для эффективного подавления активных помех операцию пространственной режекции их источников предпочтительно выполнять по первому варианту, т.е. проводить согласованную корреляционную обработку после компенсации сигналов помех. Этот метод выдвигает жесткие требования к производительности процессора устройства цифрового диаграммообразования (ЦДО) и компенсации помех.

Успехи разработчиков компании NAVSYS в освоении новых методов помехозащиты систем спутниковой навигации сыграли не последнюю роль в проявлении пристального внимания к этим методам военными ведомствами США. Например, уже в 2001 году цифровое формирование лучей и электронный синтез "нулей" диаграммы направленности в антенных решетках рассматривались ВМС США в качестве ключевой навигационной технологии для судов, подводных



**Рис.4. Принцип формирования парциального луча путем цифрового диаграммообразования после корреляционной обработки [15]**

лодок и авианосцев [16]. В частности, в 2001 бюджетом ВМС США в рамках исследований и технологических разработок по программе 0602232N "C4ISR" (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance & Reconnaissance) планировали проектирование семиэлементной ЦАР для демонстрации возможности реализации помехозащищенного приема GPS-сигналов [16]. В последующем область исследований расширилась – была поставлена задача изучения возможности использования диэлектрических резонаторных антенн, выполненных из керамики, уменьшения их габаритов (менее четверти длины волны), совершенствования алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов. В бюджетной программе 2006 года 0602271N "Прикладные исследования радиочастотных систем" (RF Systems Applied Research [17]) была инициирована отработка специализированного процессора подавления помех GPS. Программа также предусматривала завершение полевых испытаний семиэлементной ЦАР с элементами в виде печатных спиралей.

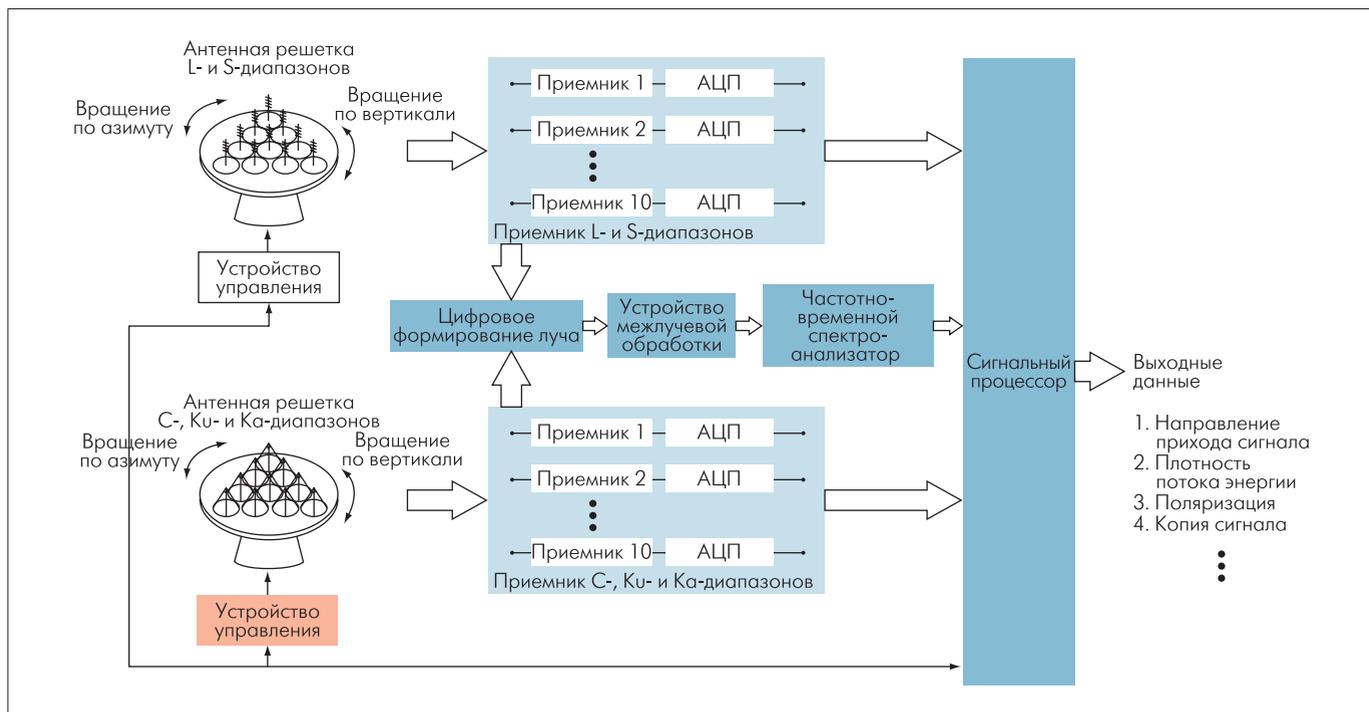
В той же бюджетной программе 0602271N на 2007 год были указаны следующие требования, которые можно использовать в качестве ориентиров при разработке средств помехозащиты [18]:

- достижение селекции на фоне помех сигналов GPS, находящихся на 12 дБ ниже уровня теплового шума;
- увеличение глубины подавления помех до 43 дБ в бортовых ЦАР корректируемых по лазерному лучу авиабомб Paveway IV и крылатых ракет "Томагавк";
- отработка методов формирования "нулей" на помеховые источники глубиной до 60 дБ;
- снижение среднеквадратических ошибок определения местоположения по данным системы GPS в сложной помеховой обстановке до 40 см в вертикальной плоскости и до 30 см в горизонтальной.

Кроме того, программа предусматривала завершение испытаний восьмиэлементной GPS-антенны для подводных лодок, размещаемой на мачте высотой 4,25 дюйма. Было инициировано создание усовершенствованного процессора подавления помех для адаптивной пространственно-частотной обработки GPS-сигналов с использованием режима кодирования PC-CGML (Poly-Channelized, Code Gated Maximum Likelihood). Это позволило бы в четырехэлементной ЦАР подавлять до восьми источников помех.

Обилие столь сложных задач и финансовые вливания военных ведомств в развитие технологии ЦАР обострили конкуренцию в сфере реализации соответствующих проектов. В результате NAVSYS оказалась не единственной компанией, занимающейся продвижением технологии ЦАР для борьбы с помехами приему GPS-сигналов.

В 2000 году британский консорциум, образованный Агентством военных исследований и оценок (Defence



**Рис.5. Применение ЦАП в системе мониторинга сигналов GPS (L-диапазон) [21]**

Evaluation Research Agency – DERA), компаниями Roke Manor Research и Raytheon Systems Limited Harlow, продемонстрировал модель перспективного цифрового антенного устройства управления (Advanced Digital Antenna Control Unit – ADACU) семиэлементной ЦАП. Модель ADACU позволяла формировать независимые парциальные лучи диаграммы направленности на шесть навигационных спутников [19].

Компания Lockheed Martin в 2004 году перешла от создания технологических демонстрационных моделей к серийному выпуску семейства помехозащищенных GPS-приемников G-STAR на базе специализированных микросхем (ASIC), получивших название BANDIT (Beamforming and Nulling Digital Technology – микросхемы, осуществляющие цифровое формирование луча и "нулей" диаграммы направленности) [20]. На их основе реализуются операции ЦДО и подавления активных помех.

По проекту Университета штата Майами (США) был разработан беспилотный летательный аппарат с помехозащищенной системой спутниковой навигации, в которой использовалось цифровое диаграммообразование [15]. Путем моделирования была подтверждена эффективность применения четырех- и девятиэлементной ЦАП для подавления трех одновременно действующих источников помех, на 40 дБ превышающих уровень GPS-сигналов.

Компания Mitsubishi Electric изучала вариант использования ЦАП в таком важном компоненте современных систем спутниковой навигации, как наземная инфраструктура мониторинга состояния спутниковой группировки и качества навигационных сигналов [21]. Рассматривалась возможность работы 10-элементной треугольной антенной решет-

ки, вписанной в окружность диаметром 2,6 м, в L-диапазоне. Принцип обработки сигналов подобной антенной решеткой приведен на рис.5. Как видно из рисунка, по выходу каждого приемного канала сигналы подвергаются аналого-цифровому преобразованию. Отдельно взятый антенный элемент вписывается в окружность диаметром 0,65 м. В пределах ширины главного луча его диаграммы направленности межканальная неидентичность коэффициентов передачи первичных каналов ЦАП по амплитуде не превышает 1,6% (0,07 дБ), по фазе – 1,3°. Когерентное накопление сигналов по апертуре ЦАП позволяет принимать сигналы, мощность которых на 15 дБ ниже уровня дисперсии шумов парциального приемника. При этом среднеквадратическая погрешность определения направления прихода сигналов составляет ~0,1° при минимальном отношении сигнал-шум 15 дБ.

Таким образом, применение ЦАП в GPS-системе позволяет более эффективно выполнять задачи спутниковой навигации в сложных помеховых условиях. На повестке дня – создание аналогичных интегрированных решений как для систем GPS, так и ГЛОНАСС, поскольку сегодня основным способом "улучшения" GPS американские специалисты считают ее объединение с технологией системы ГЛОНАСС, разработанной в СССР и превосходящей GPS по ряду параметров. Актуальность такого решения подтверждает работа ученых технологического университета Лулео (Швеция), в которой анализировались результаты применения восьмиэлементной ЦАП для обработки сигналов системы GNSS [22]. Согласно этой работе, при такой конфигурации ЦАП для приема сигналов без помех в ASIC смешанной аналоговой и цифровой обработки сигнала можно использовать двухрядные АЦП. При частоте

дискретизации 16,3676 МГц и передаче в процессорный модуль отсчетов напряжений с выходов АЦП всех восьми каналов ЦАР достаточно использовать интерфейс USB 2.0. В то же время результаты исследований, проведенных в Технологическом университете Лулео, свидетельствуют о необходимости существенного увеличения разрядности АЦП, поскольку глубина провалов, формируемых в диаграмме направленности ЦАР, пропорциональна точности дискретного представления поля в раскрытие антенной решетки [22].

В дальнейшем следует ожидать появления в рамках технологии ЦДО аналогичных многосистемных решений, охватывающих также европейскую систему спутниковой навигации Galileo.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Скорик Е.Т.** Противодействие спутниковой радионавигационной системе GPS. – Известия вузов. Серия "Радиоэлектроника", 2006, т.49, № 10.
2. **Кашин В.В.** Поможет ли США модернизация GPS? – Новый Петербург, 05.07.2001. № 27 (494). [www.x-libri.ru/elib/kashn000/index.htm](http://www.x-libri.ru/elib/kashn000/index.htm).
3. **Слюсар В.И.** Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 1.
4. **Слюсар В.И.** Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 3.
5. **Brown A.** Performance and Jamming Test Results of a Digital Beamforming GPS Receiver. – NAVSYS Corporation. Joint Services Data Exchange, May 2002. – [www.navsyst.com/Papers/0205002.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/0205002.pdf).
6. **Brown A. and Mathews B.** A Robust GPS/INS Kinematic Integrity Algorithm for Aircraft Landing. – Proceedings of ION GNSS 2006, Fort Worth, Texas, September 2006. – [www.navsyst.com/Papers/06-09-002.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/06-09-002.pdf).
7. **Слюсар В.И.** Схемотехника цифровых антенных решеток: грани возможного. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 8.
8. High Gain Advanced GPS Receiver. White Paper. – NAVSYS Corporation. September 2002. [www.navsyst.com/Papers/HAGR\\_White\\_Paper.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/HAGR_White_Paper.pdf).
9. **Reynolds D., Brown A., Reynolds A.** Miniaturized GPS Antenna Array Technology and Predicted Anti-Jam Performance. – Proceedings of the ION GPS'99, September, 1999, Nashville, TN. [www.navsyst.com/Papers/9909004.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/9909004.pdf).
10. **Brown A., Mathews B.** Test Results from a Novel Passive Bistatic GPS Radar Using a Phased Sensor Array. – Proceedings of ION NTM 2007, San Diego, CA, January 2007. – [www.navsyst.com/Papers/07-01-002.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/07-01-002.pdf).
11. **Brown A., Mathews B., Nguyen D.** GPS/INS/STAR Tracker Navigation Using a Software Defined Radio. – Proceedings of 29th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, Colorado, February 2007. – [www.navsyst.com/Papers/07-02-001.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/07-02-001.pdf).
12. Division of Command and Control Warfare Technology. Annual Report 1998. – Editor: Britt Heelge//FOA (Swedish Defence Research Agency). – Reports FOA-R-99-01089-503,504,616-SE. April 1999.
13. **Brown A., Reynolds D., Roberts D, Serie S.** Jammer and interference location system – design and initial test results. – Proceedings of the ION GPS'99, September, 1999, Nashville, TN. [www.navsyst.com/Papers/9909005.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/9909005.pdf).
14. **Brown A.** Multipath Rejection Through Spatial Processing. – Proceedings of ION GSP 2000, Salt Lake City, Utah, Sept., 2000. [www.navsyst.com/Papers/0009003.pdf](http://www.navsyst.com/Papers/0009003.pdf).
15. **Morton J.** Integrating Digital Beam Forming & Software GPS Receiver for UAV Navigation. Nov. 11, 2005. Miami University. [www.eas.muohio.edu/downloads/Morton.ppt](http://www.eas.muohio.edu/downloads/Morton.ppt).
16. Program 0602232N. Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance & Reconnaissance (C4ISR). – [www.dtic.mil/descriptivesum/Y2001/Navy/0602232N.pdf](http://www.dtic.mil/descriptivesum/Y2001/Navy/0602232N.pdf).
17. Program 0602271N. RF SYSTEMS APPLIED RESEARCH. – [www.dtic.mil/descriptivesum/Y2006/Navy/0602271N.pdf](http://www.dtic.mil/descriptivesum/Y2006/Navy/0602271N.pdf).
18. PROGRAM 0602271N. RF SYSTEMS APPLIED RESEARCH. – <http://www.dtic.mil/descriptivesum/Y2007/Navy/0602271N.pdf>.
19. Roke Manor Research's Adaptive Array is Jammed with Technology to Unjam GPS. – [www.roke.co.uk/press/20.php](http://www.roke.co.uk/press/20.php).
20. G-STAR GPS Anti-Jam Solutions.// Lockheed Martin. – [www.lockheedmartin.com/data/assets/4031.pdf](http://www.lockheedmartin.com/data/assets/4031.pdf).
21. **Yoshimasa Oh-hash, Morio Higa.** Space Radio Monitoring System. – Mitsubishi Electric ADVANCE. 1999, v.86/Jun. [global.mitsubishielectric.com/pdf/advance/vol86/Vol86.pdf](http://global.mitsubishielectric.com/pdf/advance/vol86/Vol86.pdf).
22. **Backen S., Akos D.M.** Research Report "GNSS Antenna Arrays. Hardware requirements for algorithm implementation"/ – Lulea University of Technology. Department of Computer Science and Electrical Engineering. – April 4, 2006. – <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2006/13/LTU-FR-0613-SE.pdf>.