

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ ЭМП, ОТВЕЧАЮЩИХ ТРЕБОВАНИЮ СТАНДАРТА MIL-STD-461D-F

КЕВИН СИТОН (KEVIN SEATON), ЛЕОНАРД ЛЕСЛИ (LEONARD LESLIE), инженеры, VPT

Чтобы обеспечить соответствие требованию стандарта MIL-STD-461D-F по устойчивости к наведённым помехам, на входах систем питания электронного оборудования специального назначения устанавливаются фильтры электромагнитных помех (EMI-фильтры). Вероятность превышения уровня помех этого вида чаще всего возникает в диапазоне средних частот вблизи частоты среза EMI-фильтров, как правило 1–10 кГц, где наблюдаются максимальные значения АЧХ. В статье анализируются требования к фильтрам, и делаются выводы относительно проектирования систем питания, представляющих собой комбинацию входного фильтра и преобразователя DC/DC.

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРОВ ЭМП НА НАПРЯЖЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ШИНЫ

Большинство инженеров использует фильтры электромагнитных помех, чтобы уменьшить высокочастотные паразитные помехи, генерируемые DC/DC-преобразователем в соответствии с требованиями к уровню наведённых и излучаемых помех, а также восприимчивости к ним. Кроме того, фильтр выполняет очень важную роль в ослаблении любого напряжения пульсаций, которое возникает на входной шине питания.

К счастью, фильтр, удовлетворяющий требованиям по подавлению наведённых помех, неизбежно ослабляет напряжение пульсаций шины питания на частотах выше частоты среза фильтра, исключая необходимость (соглас-

но принципу взаимности) в дополнительных мерах по проектированию. Однако фильтр, созданный только для подавления наведённых и излучаемых помех, может иметь очень высокую добротность, что позволяет уменьшить занимаемое на плате место и число используемых компонентов. Это обстоятельство осложняет соблюдение требований к испытаниям типа CS101.

На рисунке 1а показана АЧХ фильтра, предназначенного только для подавления помех. Применение таких фильтров часто приводит к усилению пульсаций напряжения входной шины на частоте среза фильтра. В результате не соблюдаются требования стандарта MIL-STD-461F и теста CS101, в особенности по восприимчивости к наведённым помехам. Несоответствие стандарту

MIL-STD-461F может обуславливаться слишком большими пульсациями на выходе DC/DC-преобразователя (т.е. ухудшением рабочих характеристик нагрузки), собственными прерываниями при больших импульсах (т.е. неожиданными прерываниями при просадке напряжения) или повреждением силового преобразователя в результате рассеивания большого количества мощности при большом уровне пульсаций.

ТРЕБОВАНИЕ К ИСПЫТАНИЮ CS101

Согласно требованию CS101 стандарта MIL-STD-461F испытываемое оборудование должно соответствовать установленным рабочим характеристикам в соответствии со спецификацией на подсистему или отдельное оборудование при подаче на силовые входы непрерывного синусоидального сигнала. Этот дифференциальный сигнал подаётся на силовые выводы с помощью усилителя мощности и повышающего трансформатора.

Величина подаваемого сигнала устанавливается либо в соответствии с кривой предельного напряжения (измеренного на входе испытываемого устройства), либо с кривой предельной мощности (измеренной на выходах задающего генератора, см. рис. 2) в зависимости от того, какое из этих значений меньше. Испытание осуществляется путём линейной развертки во всем диапазоне частот (30 Гц...150 кГц) или с помощью более сложного метода, в котором весь спектр тестируется дискретными шагами частоты при минимальном времени задержки.

Существуют два основных условия при проектировании системы питания, которая должна удовлетворять требованиям теста CS101. Первое из них

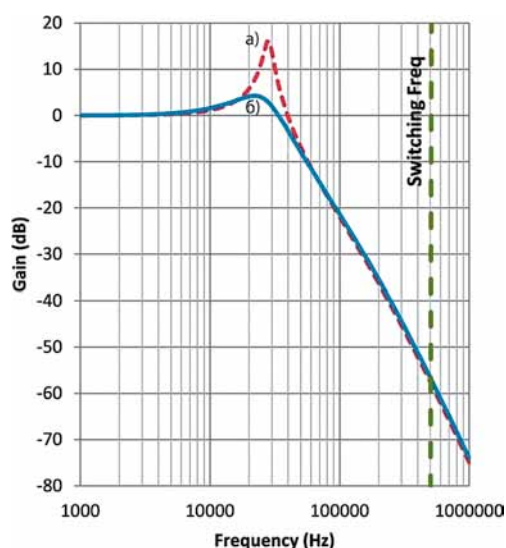


Рис. 1. АЧХ: а) недемпфированного б) демпфированного фильтра ЭМП
Gain (dB) — коэффициент усиления, дБ; Frequency (Hz) — частота, Гц; Switching Freq — частота переключения

состоит в том, чтобы внутренние компоненты этой системы не подвергались чрезмерной нагрузке (главным образом, демпфирующие элементы). Второе условие заключается в значительном ослаблении входного сигнала, чтобы уменьшить напряжение пульсаций на выходе преобразователя. Величина требуемого ослабления зависит от выбора рабочих характеристик оборудования и его чувствительности к выходному напряжению пульсаций на разных частотах.

При проектировании системы питания разработчик, как правило, не знает уровня чувствительности оборудования к выходным пульсациям, в результате чего величина ослабления выбирается исходя из стоимости системы и требований к массогабаритным показателям. И лишь затем выясняется, соответствует ли питаемое оборудование требованиям испытания CS101.

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ

В упрощенной архитектуре системы питания с EMI-фильтром, за которым следует DC/DC-преобразователь, совместная работа обоих каскадов обеспечивает ослабление входного импульса. Для DC/DC-преобразователя управление по току дает лучшее подавление импульсов в звуковом диапазоне частот, по сравнению с управлением по напряжению, благодаря ослаблению, которое обеспечивает токовая петля выходного резонатора с LC-фильтром, а также эффекту прямой связи этой петли.

Как правило, преобразователь обеспечивает хорошее подавление импульсов в звуковом диапазоне частот. Так происходит благодаря тому, что вне полосы пропускания преобразователя входной сигнал ослабляется выходным LC-фильтром. На частотах ниже этой полосы хорошее подавление обеспечивается за счет активной обратной связи с высоким коэффициентом передачи. Как правило, резонансная частота выходного LC-фильтра находится в полосе пропускания преобразователя, что обеспечивает хорошее затухание паразитных импульсов во всем спектре. У недемпфированного выходного LC-фильтра во втором каскаде наблюдается максимальный коэффициент усиления по низкой частоте, но поскольку пиковое значение АЧХ достигается на частоте, значительно превышающей резонансную частоту входного фильтра помех, во многих случаях достаточно обеспечить комбинированное подавление импульсов в звуковом диапазоне частот.

У EMI-фильтра коэффициент затухания на высоких частотах, как правило, определяется заданным уровнем осла-

бления согласно требованиям к уровню наведённых помех. При необходимости соблюсти требования CS101 в схему предварительной фильтрации, которая изначально рассчитана для подавления наведённых помех, добавляются демпфирующие элементы. Демпфирование необходимо для того, чтобы уменьшить добротность фильтра и, следовательно, максимальное значение коэффициента усиления на резонансной частоте. У этого фильтра может быть несколько резонансных частот. Среди них, в первую очередь, особый интерес, с точки зрения соответствия требованиям CS101, представляет минимальная частота (частота среза), на которой происходит усиление входного сигнала при коэффициенте усиления выше 1,0.

Если демпфирования недостаточно, усиленный сигнал на минимальной резонансной частоте может достигать больших значений. В результате задача по обеспечению соответствующего ослабления этого сигнала (помехи) переносится на преобразователь. Недостаточное затухание в фильтре побуждает изменять коэффициент обратной связи DC/DC-преобразователя, что приводит к ухудшению динамической характеристики, а также к нестабильности работы всей системы питания.

ПОДАВЛЕНИЕ СИГНАЛА В ЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Подавление помех в звуковом диапазоне частот. При анализе подавления помех в звуковом диапазоне частот EMI-фильтром в комбинации с DC/DC-преобразователем полезно разделить частотный спектр на три полосы: низкие, средние и высокие частоты. На частотах ниже частоты среза 100-% подавление обеспечивается DC/DC-преобразователем (см. рис. 3а). Это подавление осуществляется с помощью очень большого коэффициента обратной связи в широкой полосе низких частот. Управление по току также обеспечивает дополнительные преимущества.

В полосе средних частот вблизи резонансной частоты фильтра (в диапазоне 1–10 кГц) подавление сигнала в звуковом диапазоне частот осуществляется, главным образом, фильтром (см. рис. 3б). Хорошо рассчитанный DC/DC-преобразователь обеспечивает соответствующее подавление сигнала в звуковом диапазоне частот в полосе средних частот, однако эти преимущества могут быть потеряны неправильно рассчитанным фильтром, что приводит к избыточному усилению входного сигнала (помех) на звуковых частотах. Поскольку при таком расчете, который основан, в первую очередь, на требованиях к стоимости и занимаемому про-

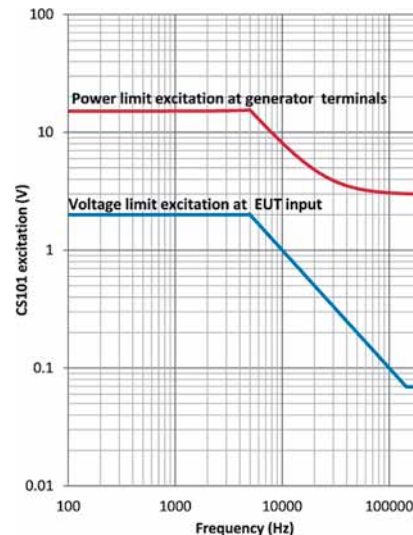


Рис. 2. Кривые предельного возбуждения в тесте CS101

CS101 excitation (V) — напряжение питания в тесте CS101, В; Power limit excitation at generator terminals — предельное значение мощности возбуждения на зажимах генератора; Voltage limit excitation at EUT input — предельное значение напряжения питания на входе испытываемого оборудования; Frequency (Hz) — частота, Гц

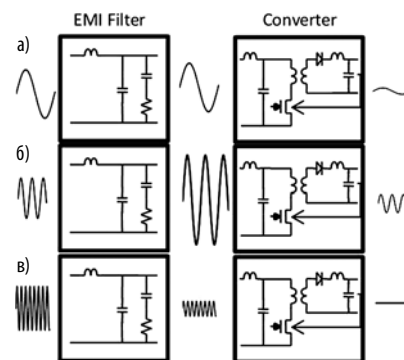


Рис. 3. Усиление сигнала, обеспечиваемое системой питания в разных диапазонах частот

EMI Filter — фильтр электромагнитных помех; Converter — преобразователь

странству, создаётся входной фильтр со слабым затуханием ($Q > 0,5$), необходимо добавить демпфирующие элементы, чтобы ограничить добротность значением 3,0. Эту величину можно ещё уменьшить, если это позволяют стоимость и габариты системы.

Однако при добротности фильтра ниже 3,0 постепенное увеличение размеров платы и числа компонентов нивелируют достигнутые преимущества. При $Q < 2,0$ размеры платы и число компонентов существенно увеличиваются, что недопустимо. В большинстве случаев уменьшение добротности фильтра приводит к увеличению коэффициента подавления звукового сигнала на резонансной частоте, что уменьшает риск несоответствия требованиям CS101. Поскольку очень трудно заранее рассчитать, насколько велико должно быть подавление звукового сигнала согласно требованиям CS101,

VPT

Power Your Critical Mission Today

DC/DC, POL, EMI-FILTER ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

- + QML
- + SMDcode
- + SPACE/K
- + MILITARY/H
- + ITAR-FREE
- + ОБРАЗЦЫ
- + СТРАХОВОЙ ЗАПАС

НИКАКИХ МИНУСОВ!



pt ELECTRONICS
Innovations & Technologies

Единый телефон: 8-800-333-63-50
office@ptelectronics.ru
www.ptelectronics.ru

Офисы компании: Санкт-Петербург, Москва, Чебоксары, Нижний Новгород,
Екатеринбург, Новосибирск, Ижевск, Таганрог, Пермь, Киев



РЕКЛАМА

целью проектирования часто становится уменьшение рисков. Как правило, система не проходит испытание CS101 в диапазоне средних частот. Именно этой полосе разработчики должны уделять наибольшее внимание.

В полосе высоких частот, которые превышают резонансную частоту EMI-фильтра, подавление звукового сигнала наблюдается, главным образом, в том диапазоне, где этот фильтр обеспечивает наибольшее подавление. Хорошо продуманная схема преобразователя также обеспечивает существенное подавление нежелательного сигнала. В большинстве случаев комбинация фильтра и преобразователя даёт очень хорошее подавление (см. рис. 3в).

АНАЛИЗ МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ

При выполнении испытания CS101 наибольший риск несоответствия его требованиям возникает вблизи резонансной частоты фильтра электромагнитных помех. При поступлении сигнала на этой частоте усилитель мощности нередко ограничивает величину сигнала согласно требованиям стандарта MIL-STD-461F к предельному значению мощности. Если частота среза фильтра ниже 5 кГц, предельная мощность задаётся с учетом выходного напряжения усилителя, при котором рассеиваемая мощность составляет 80 Вт на калиброванной нагрузке 0,5 Ом. При использовании типового повышающего трансформатора с коэффициентом трансформации 2:1 выходное напряжение усилителя составляет около 15 В_{СКЗ} (при частоте ниже 5 кГц).

Если усилитель достигает предвзительно заданного предела мощности на резонансной частоте фильтра, это не значит, что рассеиваемая фильтром мощность равна 80 Вт! Об этом свидетельствует анализ контура по переменному току. В этом контуре с повышающим трансформатором входы EMI-фильтра, по сути, расположены последовательно с конденсатором ёмкостью 10 мкФ (см. схему испытания CS101 на рисунке 4).

Рассмотрим пример системы питания, в которой резонансная частота фильтра составляет 3 кГц. Если предельное значение мощности достигается при тестировании на 3 кГц, напряжение на вторичной обмотке повышающего трансформатора, как правило, равно $7,0 \pm 0,5$ В_{СКЗ} (типичное калиброванное напряжение на выводах с учётом паразитных элементов трансформатора). На частоте 3 кГц импеданс конденсатора ёмкостью 10 мкФ составляет $-j5,3$ Ом. Этот импеданс добавляется к комплексному входному импедансу фильтра.

На практике импеданс конденсатора ёмкостью 10 мкФ, включенный последовательно входному импедансу филь-

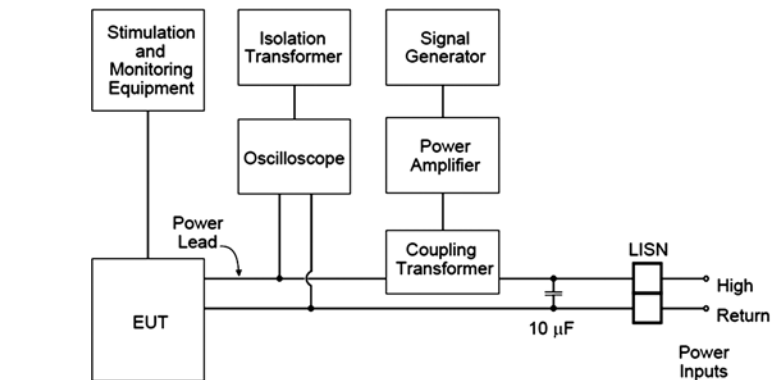


Рис. 4. Структурная схема стенда испытаний CS101

Stimulation and Monitoring Equipment — контрольно-испытательная аппаратура; Power Lead — силовой вывод; EUT — испытуемое устройство; Isolation Transformer — изолирующий трансформатор; Oscilloscope — осциллограф; Signal Generator — генератор сигнала; Power Amplifier — усилитель мощности; Coupling Transformer — трансформатор межкаскадной связи; LISN — схема стабилизации полного сопротивления линии; High — вывод с высоким потенциалом; Return — вывод возврата сигнала; Power Inputs — силовые входы

тра, больше калиброванной нагрузки 0,5 Ом. По этой причине ток подаваемого сигнала намного меньше, чем ток, генерируемый при калибровочном тесте с рассеиваемой мощностью 80 Вт. Хотя фильтр, как правило, не рассеивает мощности такой величины, демпфирующие элементы в нем могут рассеивать намного большую мощность на резонансной частоте, что следует учесть разработчику при выборе их размеров. Очевидно, что внешний конденсатор ёмкостью 10 мкФ играет очень важную роль в ограничении переменного тока в фильтре и, следовательно, рассеиваемой мощности демпфирующих элементов.

Внешний конденсатор на 10 мкФ образует недемпфированный резонансный LC-контур с 50-мкГн схемами стабилизации полного сопротивления линии (line impedance stabilization networks, LISN) с собственной резонансной частотой 5 кГц. Другой резонансный LC-контур образуется из LISN-цепей и суммарной ёмкости входного каскада системы питания (включая EMI-фильтр и входной каскад DC/DC-преобразователя). Если резонансная частота LISN-цепей и входного конденсатора системы питания меньше резонансной частоты LISN-цепей и 10-мкФ конденсатора, эта система войдет в резонанс с LISN-цепями при испытании CS101. Этот резонанс приводит к увеличению мощности рассеяния демпфирующих элементов в фильтре ЭМП.

Попытки увеличить ёмкость внешнего конденсатора на 10 мкФ, чтобы исключить условия возникновения резонанса системы питания с цепями стабилизации полного сопротивления линии, являются нарушением условий испытания CS101, которое явно не предусматривает такие допуски.

Более того, искушение увеличить ёмкость внешнего конденсатора, которое часто возникает у разработчиков, сопряжено с определенными риска-

ми. Так, при повышении этой ёмкости уменьшается импеданс на частоте среза фильтра ЭМП. Поскольку этот конденсатор, по сути, установлен последовательно с фильтром, то повышение ёмкости приводит к уменьшению общего импеданса нагрузки повышающего трансформатора, в результате чего увеличивается значение подаваемого переменного тока. Увеличение его амплитуды приводит к большему рассеиванию мощности в EMI-фильтре.

При выполнении испытания CS101 необходимо также учитывать то влияние бросков тока при включении системы питания, которое они оказывают на усилитель мощности. Если этот усилитель и повышающий трансформатор находятся в одной цепи, то при включении испытуемого устройства бросок тока через трансформатор может повредить выходной каскад усилителя. Чтобы этого избежать, рекомендуется отсоединить выходные зажимы усилителя мощности от первичной обмотки повышающего трансформатора, пока испытуемое устройство не перейдёт в устойчивый режим.

Однако следует заметить, что отсоединение усилителя мощности при включении устройства вызывает другую проблему. Импеданс вторичной обмотки повышающего трансформатора существенно повышается, т.к. он становится равным индуктивности намагничивания этой обмотки, когда первичная разомкнута. Высокая индуктивность входных проводов питания приводит к нестабильной работе преобразователя при включении схемы. Эта проблема решается путём включения системы питания в ненагруженном состоянии или установкой резистора на 5 Ом параллельно первичной обмотке. При использовании этого резистора с коэффициентом трансформации 2:1 сопротивление силовых входов составит всего лишь 1,25 Ом. Это достаточно малая величина, чтобы привести к

нестабильной работе мало- и средне-мощных преобразователей.

Таким образом, в калибровочном испытании необходимо использовать 5-Ом резистор. Его влияние на калибровку невелико благодаря тому, что он установлен параллельно 2-Ом входному импедансу повышающего трансформатора. Поскольку при проведении калибровочного испытания 28-В систем на 5-Ом резисторе рассеивается 32 Вт, у этого компонента должны быть соответствующие размеры.

Итак, правильный выбор размеров демпфирующих элементов, которые должны выдержать нагрузку при проведении испытания, является основным условием соответствия требованию CS101. Кроме того, чтобы запитываемое оборудование отвечало заявленным характеристикам, необходимо обеспечить достаточное ослабление сигнала в системе питания. При анализе этой системы следует ослабить входной сигнал, уменьшив напряжение пульсаций на нагрузке. Поскольку в большинстве случаев чувствительность нагрузки к пульсациям выходного сигнала во всём спектре частот заранее неизвестна, величина ослабления системы питания устанавливается путём проведения теста CS101 при питании нагрузки.

Во время этого испытания, в первую очередь, контролируется не выходное напряжение пульсаций системы питания, а эксплуатационные показатели нагрузочного оборудования. Считается, что эта система успешно прошла испытание CS101 в том случае, если нагрузка не вызвала остаточного повреждения, и оборудование продолжает соответ-

ствовать требованиям, заявленным в спецификации.

ВЫВОДЫ

Система питания, отвечающая требованиям стандарта MIL-STD-461 к уровню помех и восприимчивости к ним, обеспечивает хорошее подавление звукового шума во всем спектре частот при тестировании CS101. Для этого используется дополнительное демпфирование в цепи фильтра, позволяющее уменьшить эффект усиления, который неизбежно возникает на частоте среза фильтра. Добавление в систему демпфирующих элементов объясняет, почему фильтры, предназначенные для ответственной техники, как правило, легче фильтров для коммерческого применения, которые не отвечают требованиям по восприимчивости и устойчивости к помехам.

Большинство фильтров и преобразователей обеспечивает хорошее подавление сигнала на низких и высоких частотах, не требуя дополнительных усилий со стороны разработчика. Однако чтобы обеспечить подавление этого сигнала в полосе средних частот вблизи частоты среза фильтра, требуются демпфирующие элементы. При уменьшении восприимчивости фильтра к наведённым помехам его добротность снижается до такого приемлемого уровня, который ещё позволяет учесть повышение мощности рассеивания в испытании CS101. Демпфирующие элементы, как правило, не оказывают влияния на рабочие характеристики фильтра в полосе низких и высоких частот. Однако в полосе средних частот,

в которой риск отказа системы наиболее высок, эти элементы играют определяющую роль.

При реализации требований стандарта MIL-STD-461 по восприимчивости оборудования специального назначения к наведённым помехам необходимо выбрать соответствующий фильтр. Например, компания VPT предлагает широкий ряд фильтров, специально предназначенных для систем, которые соответствуют требованиям стандарта MIL-STD-461 (версии C-F). К числу этих фильтров относятся изделия, которые обеспечивают надёжность разного уровня, начиная с серийной продукции специального назначения (жёсткие климатические и/или вибрационные условия) с высокой степенью надёжности и заканчивая герметичными гибридными фильтрами для высоконадёжных систем, отвечающим требованиям стандарта MIL-PRF-38534 Class K (Space).

За дополнительной информацией и для запроса образцов обращайтесь к эксклюзивному дистрибьютору компании PT Electronics:

194214, Санкт-Петербург, пр. Энгельса 71
тел.: +7 (812) 324-6350, доб. 2331
valery.burmistrov@petrointrade.ru
www.petrointrade.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. Department of Defense. MIL-STD-461F, CS101 Detailed Requirement & Appendix A. 2007.
2. R. D. Middlebrook. Input Filter Considerations in Design and Application of Switching Regulators. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1976. Pp. 91-107.

СОБЫТИЯ РЫНКА



КОМПАНИЯ VPT ВВОДИТ В ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННУЮ ЛАБОРАТОРИЮ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СЕРВИСНЫЕ СЛУЖБЫ

VPT Inc., являющаяся дочерней компанией HEICO, анонсировала комплексную радиационную лабораторию и вспомогательные сервисные службы для проведения испытаний на радиационную стойкость и связанных с ними тестов. В подобных испытаниях нуждаются производители аэрокосмической электроники.

В помещении Si-REL площадью 5000 кв. футов в г. Челмсфорд (шт. Массачусетс) установлено оборудование, и созданы все условия для оценки характеристик электронных устройств в условиях ионизирующего излучения, приводящего к их деградации. В радиационной лаборатории предлагаются решения для проверки воздействия высокой дозы излучения (HDR) с излучателем TID GC-200 и низкой дозы излучения (LDR) с излучателем TID с широкой диаграммой излучения для расширенного анализа чувствительности к LDR. В предоставляемых услугах нуждаются и производители биомедицинской аппаратуры.



Радиационная лаборатория VPT отвечает требованиям стандартов MIL-STD-750 и MIL-STD-883, имеет сертификат соответствия агентства по тыловому обеспечению министерства обороны США. Оборудование и услуги предоставляются не только пользователям в США, т.к. в лаборатории выполняются требования 22900 Европейского координационного агентства по космическим компонентам (European Space Components Coordination, ESCC).

www.vptrad.com