

ПОДАВЛЕНИЕ РАДАРОВ ПРОТИВОРАКЕТНОЙ ОБОРОНЫ ТЕАТРА ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ АКТИВНЫМИ ЛОЖНЫМИ ЦЕЛЯМИ

Шерман Франкель

Проведено исследование методов, при помощи которых ложные цели различной сложности могут подавить радары противоракетной обороны театра военных действий (ТВД). Особое внимание уделено описанию системы активных ложных целей, состоящих из передатчиков, расположенных как на ложной цели, так и на боеголовке, которые являются "маскирующими станциями умышленных помех", возвращающими обратные сигналы на радары, одинаковые для ложной цели и для боеголовки. Эти сигналы "забивают" обычные отраженные сигналы от боеголовки и ложной цели. Метод зависит только от знания электромагнитной теории и не требует знакомства с засекреченными материалами. Он основан на особых свойствах имеющихся в наличии "частотно-независимых антенн". Такие ложные цели могут подавить планируемую в настоящее время систему противоракетной обороны (ПРО) Обороны Площадей Театра на Больших Высотах (ОПТВ).

Шерман Франкель - профессор факультета физики и астрономии Пенсильванского Университета, Филадельфия, Пенсильвания, США.

ВВЕДЕНИЕ

Развертывание тщательно сконструированных ложных целей - это хорошо известный способ подавления системы ПРО¹. Несомненно, что такой путь будет в будущем выбран любой стороной, противостоящей сильной обороне США. Ключевой вопрос состоит в том, можно ли будет сделать ложные цели неотличимыми от ракет. Неотличимость означает идентичность возвращаемых сигналов от ложной цели и ракеты на любой рабочей частоте радара².

Организация по обороне от баллистических ракет (ООБР) правительства США в настоящее время расходует большие суммы на исследование и развертывание антибаллистических ракет, предназначенных для уничтожения атакующих ракет в полете. В таких системах ПРО радары определяют положение летящей ракеты и предоставляют информацию для запуска противоракеты, способной следить за ракетой и уничтожить ее. Основным вопросом, от ответа на который будет зависеть соотношение стоимости и эффективности усилий, будет возможность реализации контрмер, которые смогут заметно понизить эффективность системы. В таком случае надо будет обратить большее внимание на другие методы, способные доказать свою эффективность. К таким методам могут относиться перехват на активном участке и разрушение платформ запуска.

В этой работе мы рассмотрим систему ложных целей общего назначения, и обратим особое внимание на то, как противник может подавить систему ПРО Обороны Площадей на Больших Высотах (ОПТВ). В настоящее время производится разработка этой системы, и ожидается, что она будет развернута примерно в 2004 г. Она предназначена для перехвата боеголовок *над атмосферой*, где, на самом деле, разработка ложных целей наиболее проста. Однако, решение о перехвате должно быть принято до момента входа в атмосферу, поскольку после этого для противоракетного перехвата останется слишком мало времени.

Важным отличием ложных целей, используемых в оружии ТВД, является весьма малое время полета по сравнению с теми, которые сопровождают межконтинентальные баллистические ракеты. Следовательно, эффективность ложных целей тем выше, чем меньше дальность ракеты.

В нашей работе мы рассмотрим три вида ложных целей: (1) обычные пассивные ложные цели, которые инертны и только отражают сигналы радара, (2) системы "активного камуфляжа" с передатчиками, которые излучают заранее запрограммированные сигналы "умышленных помех" и "камуфляжа" на принимаемой частоте, и (3) "разумные" ложные цели и ракеты, которые при помощи встроеного компьютера определяют нужные характеристики передаваемого сигнала по полученной в полете информации.

Тем не менее, основное внимание в этом сообщении уделяется ложным целям и ракетам с передатчиками, которые исследованы нами как теоретически, так и экспериментально. (Мы хотели бы подчеркнуть здесь, что у нас нет намерения утверждать, что тщательно разработанные пассивные ложные цели не могут быть эффективными. Пассивные ложные цели отличаются от рассматриваемых нами малых ложных целей тем, что их размеры должны быть больше, чтобы они могли имитировать временной профиль радара возвратных сигналов ракеты или боеголовки. Кроме того, очень малые активные ложные цели будут отличаться от пассивных ложных целей по характеристикам входа в атмосферу.)

Радары могут быть частью системы обороны, состоящей из радаров поиска и слежения, работающих в разных диапазонах длин волн. Они могут обладать высоким разрешением по дальности, которое дает им способность определения длины атакующей ракеты или боеголовки. Они могут также обладать способностью использовать сложный анализ поляризации, скачкообразное изменение частоты, методы автокорреляции и сжатия импульсов, и т.д. Следовательно, система активной ложной цели должна обладать возможностью подавления контр-контрмер, которые могут быть созданы при помощи таких возможностей.

Рассматриваемые нами "активные" ложные цели возвращают обнаруженные сигналы как с ложной цели, так и с ракеты на частоте приема, какой бы она ни была, в очень широком диапазоне частот. Они представляют "маскирующие станции умышленных помех", которые различными способами маскируют нормальный отклик для радаров ПРО. Более того, временной профиль сигналов от передатчиков на ложных целях и ракетах могут быть сделаны одинаковыми. Для разработки таких систем не нужен доступ к секретной информации, поскольку она базируется только на известной физике электромагнитного излучения.

Мы опишем также криптографически защищенную ленту для запоминания данных, которая может быть использована для моделирования возвратных сигналов радаров. Она может быть исследована Организацией по обороне от баллистических ракет (ООБР), либо любой независимой группой исследования контрмер для оценки достижения наших целей.

Основным выводом из нашей работы является то, что инженеры любой страны третьего мира, способные запускать баллистические ракеты, могут разработать системы, по крайней мере, столь же совершенные, как та, которая описывается нами. Нужные компоненты доступны и могут быть легко приобретены на открытом рынке. Не имеется запрета на продажу антенн и усилителей, используемых в системах ложных целей с передатчиками.

Изучение активных ложных целей - это прекрасная интеллектуальная инженерная проблема, подходящая

для обучения студентов. Под руководством автора два студента Пенсильванского университета по специальности инженер-электрик³, при помощи двух инженеров⁴, в своей дипломной работе исследовали систему передатчика. Мы провели измерения в безэховой камере⁵, и использовали антенны⁶, усилители, и спектральные анализаторы⁷, предоставленные другими компаниями и исследователями⁸. Инженеры действовали как "адвокаты дьявола" для проверки некоторых основных идей для ложных целей, рассматриваемых в наших исследованиях.

АКТИВНЫЕ ЛОЖНЫЕ ЦЕЛИ

Основная идея, позволяющая обойти положение о том, что для разработки ложной цели необходимо знать секретную информацию о радаре ПРО, состоит в том, что надо иметь систему, которая возвращает радару сигналы, которые неотличимы от тех, которые отражаются от ракеты, или от ложной цели.

Например, обороняющаяся сторона имеет возможность изменять частоту радара неизвестным для атакующей стороны способом. Однако, частоту радара знать необязательно. Это возможно благодаря разработке антенн с независимыми от частоты характеристиками, которых не было десятилетия назад, и которые могут передавать или принимать сигналы в очень широком диапазоне частот. Вместе с широкополосными усилителями они могут посылать мощные маскирующие сигналы назад к радарам на принимаемой частоте. Поэтому изменения частоты радара, даже от импульса к импульсу, не помогут подавить описываемую нами систему ложных целей.

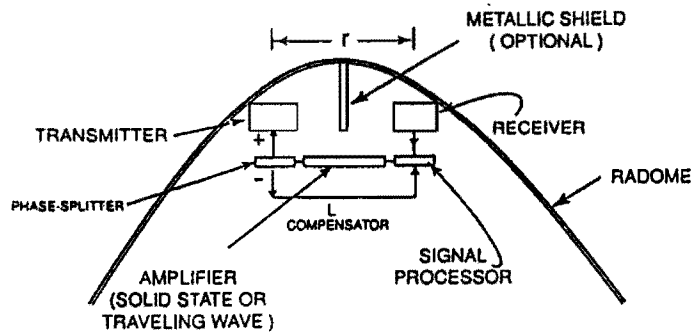
Желательно использовать небольшие легкие ложные цели для того, чтобы развернуть большое количество ложных целей без большой потери в дальности ракеты. Поскольку дифференциальное сечение рассеяния излучения радара небольших ложных целей отличается от сечения большей ракеты (это означает, что величина отраженного сигнала на разных углах луча радара по отношению к мишени может различаться), и потому что радары с высоким разрешением по дальности могут различать цели по их длине и форме, следует иметь возможность компенсировать эти различия соответствующей техникой камуфляжа. К счастью, разработчик ложных целей может все свойства ложных целей и ракет, так что вся информация для разработки у него имеется. Более того, разработчик может не только сделать ложную цель похожей на ракету, но и сделать ракету похожей на ложную цель.

Основная идея состоит в том, чтобы установить в носовой части как ракеты, так и ложной цели, ретранслятор, как показано на эскизе рисунка 1. Для последующего обсуждения точная форма носовой части боеголовки несущественна.

Ретранслятор должен обладать следующими свойствами: (а) его приемник, расположенный вблизи носовой части боеголовки или ложной цели, принимает сигналы от радара несколько раньше, чем сигналы, отразившиеся от основной конструкции ракеты или ложной цели, и (б) он переизлучает назад к радару сигнал на принимаемой частоте, который усиливается и кодируется, через передающую антенну ретранслятора. Среднее усиление определяется из известного отношения величины сигналов, отраженных от ракеты и от ретранслятора. Возвращаемый сигнал делается больше, чем сигналы, отраженные от конструкции ракеты или ложной цели, и приходит к радару раньше. Ретранслятор не является "усиливающей станцией умышленных помех", парализующей приемники радара, а "маскирующей станцией умышленных помех". (Хотя на рисунке и показаны разделитель фаз и возвратный путь обратной связи, называемые L-компенсацией, в дальнейшем они не будут упоминаться в обсуждении, так что передатчик можно считать непосредственно соединенным с приемником.)

Возвратный сигнал от ракеты может содержать всплески от ребер ракеты и возвратные сигналы от острых краев и задней части. Операторы радаров обуча-

ются распознавать такие особенности, а математическая обработка, ставшая возможной благодаря современным компьютерам, позволяет сравнить возвратные сигналы от последовательных импульсов радара для получения хорошей оценки временного распределения возвратных сигналов радара от конкретной ракеты. Следовательно, в принципе радары могут отличить ракеты от ложных целей, анализируя детали отраженных сигналов.



THE TRANSPONDER

Рисунок 1: Схема размещения аппаратуры внутри кожуха радиолокатора. Блок ретранслятора состоит из приемной и передающей антенн, усилителя и процессора сигналов для изменения ретранслируемого микроволнового сигнала для моделирования реальных отражений. Возможно использовать также разделитель фаз и петлю обратной связи (компенсатор) для улучшения изоляции приемной антенны от передающей антенны.

Однако, возвратный сигнал ретрансляторов ложных целей и ракет - это искусственный сигнал, который также может содержать всплески и другие возвратные характеристики реального отраженного от ракеты сигнала. Один из способов достижения этой цели в линейном режиме состоит в пропускании сигналов через очень короткие линии задержки, сложении сигналов для получения искусственных отражений в различные моменты времени, соответствующие различным отражениям по длине ракеты.

Однако, импульсы распределены в интервале времени, эквивалентном длине реального возвратного сигнала от ракеты. В этом методе импульсы от ложной цели и от ракеты одинаковы по длине и делаются одинаковыми по характеристикам отклика. (На самом деле, отклики ретрансляторов не должны быть одинаковыми и могут быть разными для ракеты и различных ложных целей, так что нельзя будет собрать *общего* сигнала, характеризующего боеголовку, и сохранить его для опознавания образца. Более того, для нарушения работы автокорреляционных цепей можно будет включить дополнительные импульсы со случайным положением во времени, изменяющимся *от импульса к импульсу*. Это нарушит автокорреляционный анализ, образуя весьма эффективный шумовой сигнал для подавления попыток выделения прямых отражений от ракеты.)

С ракетами можно обращаться так же, как с ложными целями. Например, на ракете можно случайным образом устанавливать физические выступы, так чтобы не было стандартного профиля ракет, даже для отраженных сигналов, которые, в любом случае, могут маскироваться более мощными сигналами ретранслятора. Более того, для предотвращения распознавания конструктор ракеты может облегчить эту проблему, применяя погло-

щающие покрытия для уменьшения поперечного сечения ракеты. Эти покрытия могут быть использованы также для изменения профиля каждой ракеты. Некоторые современные методы являются широкополосными. Применяя тонкий слой ферритового поглотителя (пять слоев по 1,5 мм), можно достичь поглощения в 10 дБ в диапазоне от 5 до 20 ГГц¹⁰. Черная ацетиленовая резина с углеродным наполнителем также обеспечивает потери в 10 - 12 дБ. Такие поглотители изготавливаются в целой отрасли промышленности.

Перечислим теперь несколько вопросов, ответы на которые будут рассматриваться в следующих разделах:

- (i) Какие антенны могут быть использованы в ретрансляторе для автоматического возврата принимаемой частоты?
- (ii) Какие имеющиеся в продаже антенны могут быть использованы в ретрансляторе в такой конфигурации, чтобы обеспечить достаточную развязку приемника и передатчика?
- (iii) Какое усиление по мощности должен обеспечить усилитель?
- (iv) Каким образом система будет реагировать на изменения поляризации сигнала радара, чтобы обеспечить необходимое превышение сигнала передатчика над отраженным сигналом вне зависимости от поляризации падающего излучения и изменения эллипса поляризации при отражении?

ПОДХОДЯЩИЕ АНТЕННЫ

Из-за того, что точная частота радара неизвестна, надо использовать антенну, способную принимать и передавать сигналы в широком диапазоне частот. Такие антенны называют "частотно-независимыми" антеннами; имеется много разновидностей таких антенн: спиральные, двусторонние спиральные, логопериодические, геликоидальные и рупорные. Мы провели экспериментальное исследование спиральной антенны AEL¹¹ ASO 1563 для ее использования в передатчике. Она принадлежит к типу архимедовой спирали и излучает поляризованную по кругу волну. Она работает в диапазоне от 2 до 18 ГГц, с запасом перекрывающим весь ожидаемый диапазон работы радаров. Такие антенны обладают свойством принципиальной и практической независимости диаграммы направленности антенны от частоты. Вес и размеры антенны невелики. Антенны, с которыми мы работали, имеют диаметр около 12,5 см, а их вес составляет около 150 г. Если допустимо ограничение диапазона до 4 - 18 ГГц, то легко изготовить антенны вдвое меньшего размера, и возможно создание еще меньших антенн. (Узкополосные антенны обычно обладают более узкой диаграммой и большим коэффициентом усиления, и требуют менее мощных усилителей ретранслятора.)

Пара расположенных рядом антенн составят узел ретранслятора с правой круговой поляризацией, принимающего и посылающего назад излучение с правой круговой поляризацией. Потери при приеме излучения с линейной поляризацией составляют всего 3 дБ. Имеются также антенны с двусторонними архимедовыми спиралями, комбинирующие прием и передачу излучения с левой и правой круговой поляризацией. На рис. 2 показана типичная двусторонняя антенна из каталога антенн AEL.

Квадроретранслятор с парой правосторонних и парой левосторонних антенн может принимать излучение с круговой поляризацией любого направления, также, как и сигналы с любой линейной поляризацией. Если использовать двусторонние антенны, то будет достаточно одной пары антенн. Таким образом, подобный ретранслятор может работать с радаром ПРО любой поляризации.

Мы хотим подчеркнуть, что ширина полосы современных частотно-независимых антенн значительно шире, чем у любой отдельной антенны радара, которая будет использоваться в обозримом будущем. Диапазон антенн системы ОПТВВ составляет 8 - 12 ГГц.

Важно знать, насколько большую мощность усилителя, показанного на рис. 1 между приемником и передатчиком, можно использовать без того, чтобы ретранс-

лятор не вошел в режим генерации. Это требует знания "изоляции" антенн, т.е. доли мощности передатчика, которая будет перехватываться приемником.

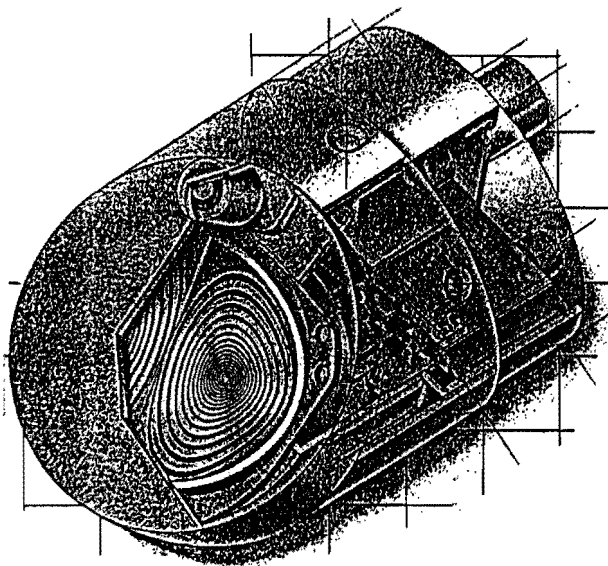


Рисунок 2: Двусторонняя антенна оборонной корпорации AEL, которая может принимать сигналы с левой и правой круговой поляризацией. Она принимает также излучение с линейной поляризацией.

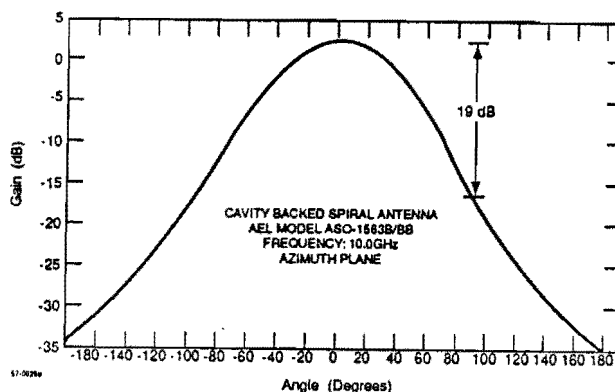


Рисунок 3: Диаграмма направленности антенны AEL на частоте 10 ГГц; аналогичная диаграмма для спиральной антенны показана на рис. 4.

Изоляцию пары антенн можно измерить на месте, но мы показали также, что как для спиральных, так и для рупорных антенн перекрестную связь можно рассчитать по структуре поля антенны в дальней (фраунгоферовской) зоне, которая для этих типов антенн была опубликована. Интересно отметить, что мы обнаружили, что принимаемая антенной мощность в зависимости от расстояния до аналогичной передающей антенны быстро уменьшается даже в ближней (френелевской) зоне (как $1/r^2$). Эта область соответствует расстоянию между антеннами порядка нескольких длин волн. Интересно, что мы обнаружили, что такая же зависимость $1/r^2$ имеет место, когда обе антенны ориентированы в одном направлении, как в ретрансляторе. В этом случае (см. рис. 4) мы обнаружили, что изоляция равна 40 дБ для двух расположенных рядом на расстоянии в 5 см спиральных антенн на частоте 10 ГГц. При увеличении расстояния до 10 см изоляция увеличивается еще на 14 дБ. Если диаграмма направленности антенны характеризуется функцией $P(\theta)$, то изоляция в конфигурации ретранслятора будет равна

$P^2(90^\circ)$. Диаграмма направленности исследованной нами антенны показана на рис. 3. Подтверждение наших рассуждений иллюстрируется рис. 4. (На самом деле, как видно из рис. 4, изоляция несколько больше, поскольку мощность измеряется по отношению к приемнику, находящемуся на расстоянии в 5 см от передатчика, где перехватывается только часть передаваемой мощности. Мы оценили, используя рис. 3 и размеры антенны, что к значениям изоляции, показанным на рис. 4 надо прибавить еще 3 дБ.)

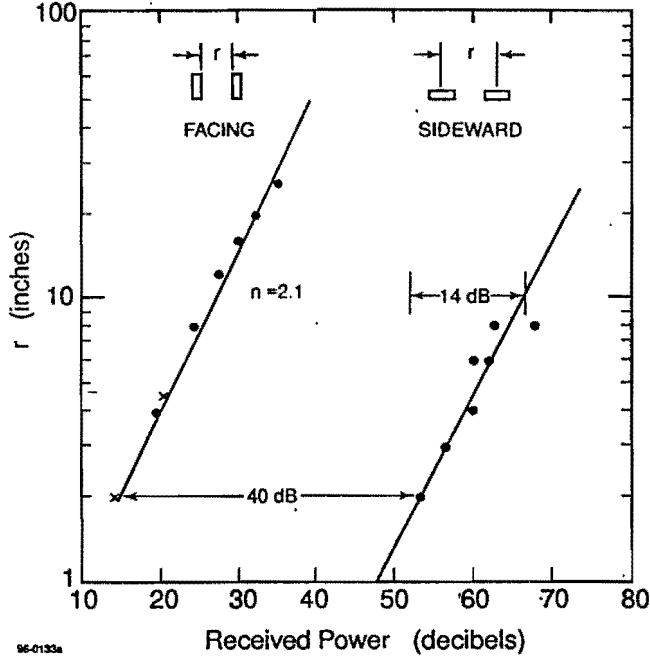


Рисунок 4: Зависимость принимаемой мощности от расстояния между антеннами, направленными друг на друга, и в конфигурации ретранслятора, где они ориентированы в одном направлении, иллюстрирующая как зависимость $1/r^2$, так и фактор изоляции.

Мы проверили также соотношения для спиральной антенны на частотах 3 и 12 ГГц. Расчетное значение изоляции для частоты 3 ГГц равно 23 дБ, а измеренное - 23,8 дБ. Частота 3 ГГц соответствует нижней границе частотно-независимой области. На частоте 12 ГГц расчетное значение изоляции равно 40 дБ, а измеренное значение - 32 дБ. Однако, эти значения менее надежны, поскольку они не основаны на полной кривой, как на рис. 4, а только на простом сравнении параллельных и повернутых антенн. Изоляция малых рупорных антенн с узкой диаграммой направленности будет больше.

Очевидно, что развязку антенн можно еще более усилить, используя либо поперечный металлический экран, либо поглотители. Данные, полученные студентами о влиянии экранирования тонкой (1 мм) алюминиевой пластиной показаны на рис. 5. Установка алюминиевого экрана несколько понизит усиление на очень больших углах, но при этом будет получена дополнительная изоляция в 25 дБ. Мы не исследовали немагнитических поглотителей. В литературе описаны более сложные методы экранирования¹². Как мы увидим позже, коэффициент усиления усилителя, необходимый для преодоления отражения от ракеты, значительно меньше, чем достижимая изоляция.

Уменьшение чувствительности, которое характеризует прием излучения с правой поляризацией на левосторонней антенне, или фактор кросс-поляризации, обычно равен 40 - 50 дБ. На рис. 1 показан только один усилитель. Однако, если используются двусторонние антенны, на каждой секции должен быть установлен свой усилитель. Можно, тем не менее, установить переключатель, определяющий, на какой из спиралей будет наблюдаться больший сигнал, и подающий усиленный сиг-

нал на спираль передатчика с соответствующей ориентацией. Если этого не делать, то большие сигналы будут поданы на обе секции выхода передатчика и интерференция приведет к появлению линейно поляризованного возвратного сигнала.

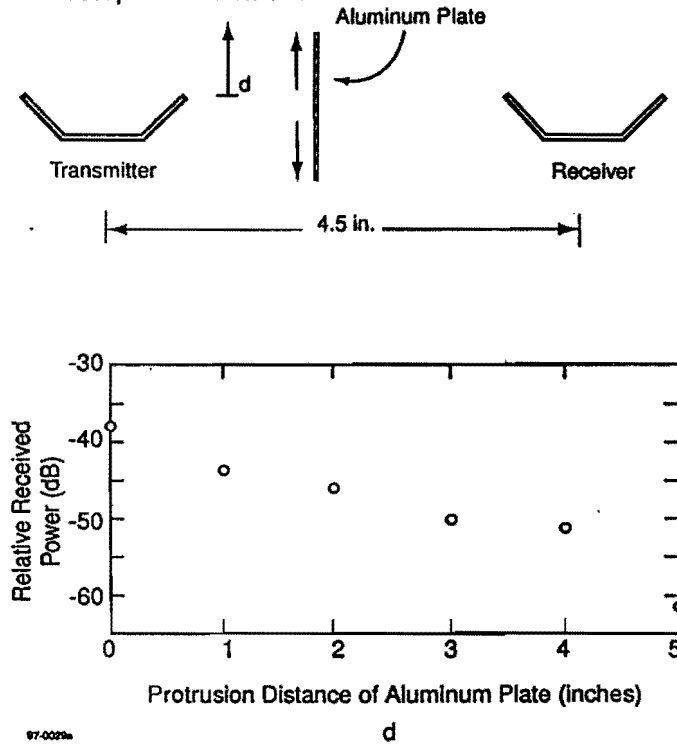


Рисунок 5: Влияние алюминиевого экрана на изоляцию.

Возвратимся теперь к более подробному описанию рисунка 1. Снова пренебрежем на время разделителем фаз и L-компенсатором, показанными на этом рисунке. В конфигурации без компенсатора вопрос, на который должны были ответить наши измерения, заключался в том, какую часть излученного передатчиком сигнала перехватывала антенна приемника (этот параметр мы называли изоляцией). Для того, чтобы такой передатчик был устойчивым и не переходил в режим генерации, требуется, чтобы произведение коэффициента усиления приемника G_0 на коэффициент обратной связи K было меньше единицы: $G_0 \cdot K < 1$. Из выражения для коэффициента усиления с обратной связью $G = G_0 / (1 - G_0 \cdot K)$ следует, что когда $G_0 \cdot K = 1$, коэффициент усиления становится бесконечным, что соответствует переходу усилителя в неустойчивый режим.

Возможность генерации появляется только тогда, когда фаза сигнала обратной связи совпадает с фазой входного сигнала, т.е. когда сигналы складываются, а не вычитаются. Такая обратная связь называется положительной. Если радар работает на одной частоте, то можно обеспечить отрицательную обратную связь, установив кабель нужной длины между приемной антенной и усилителем. Однако, это может не обеспечить нужного режима при работе радара в широком диапазоне частот.

Очень сильного уменьшения доли обратной связи в принципе можно добиться, добавив показанный на рисунке компенсатор. К схеме добавляется разделитель фаз, разделяющий сигнал усилителя на сигналы равной величины; один из которых направляется в цепь, а второй, противоположный по знаку, возвращается на вход усилителя после ослабления в L раз (см. рис. 1). В этом случае коэффициент усиления становится равным $G = G_0 / (1 - G_0 \cdot (K - L))$. Если отрегулировать разделитель раз таким образом, что $(K - L)$ будет равно одному проценту от K , то можно будет добиться дополнительной изоляции мощности в 40 дБ.

Такое добавление не только позволяет справиться с проблемой генерации, но и решает еще несколько проблем, ограничивающих универсальность передатчика. Во-

первых, можно будет уменьшить расстояние между приемником и передатчиком для дальнейшего сокращения размеров ложной цели. Во-вторых, можно будет использовать антенны с еще более широкой диаграммой направленности, чем рассматриваемые в этой работе. Хотя сигнал с обсуждавшихся нами антенн уменьшается на угле в 45° всего в 4 раза (см. рис. 3), можно будет устанавливать антенны с более слабым уменьшением, не опасаясь возникновения генерации. Это позволит справиться с радаром, расположенными не в направлении на цель. Кроме того, это позволит устранить еще один эффект, который мог бы использоваться для различения боеголовки и ложных целей. Космические объекты часто прецессируют вокруг основной оси. Характеристическая частота "дрожания" боеголовки и ложных целей может различаться. Однако, если диаграмма направленности антенны $P(\theta)$ не зависит от угла, то обнаружить дрожание не удастся. Следовательно, если компенсатор позволит еще более увеличить изоляцию, которая, как мы показали, и так весьма велика, его достоинством будет возможность использовать широкоугольные (возможно, почти изотропные) антенны, расположенные близко друг от друга.

АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЯ ПЕРЕДАТЧИКА

Какое усиление и какой уровень мощности нужны для питания передающих антенн ретранслятора? Усиление не представляет особой проблемы, поскольку легко приобрести очень компактные усилители с широким рабочим диапазоном. Например, усилитель AFS4 корпорации MITEQ обеспечивает усиление 14 дБ в диапазоне от 6 до 18 ГГц. Для достижения большего усиления усилители могут быть объединены в каскад. Имеется большой выбор таких усилителей с различными коэффициентами усиления, диапазонами и шумовыми характеристиками. Однако, требования выходной мощности могут привести к выбору ламп бегущей волны (ЛБВ), которые обладают высокой мощностью и широким диапазоном. Имеется широкий ассортимент таких ламп с различными диапазонами и более чем достаточной мощностью. Например мини-ЛБВ L-5936 фирмы Литтон работает в диапазоне от 4,5 до 18 ГГц с выходной мощностью до 20 Вт и коэффициентом усиления 40 дБ. Компания Вариян выпускает большой ассортимент усилителей, некоторые из которых обозначаются как компоненты для "электронной войны". Например, можно приобрести ЛБВ диапазона 6 - 18 ГГц с минимальной выходной мощностью 80 Вт с размерами $313 \times 20 \times 46$ мм и массой 680 г. Поскольку устройства будут применяться в течение короткого времени с малой частотой повторения, можно будет сравнительно легко разработать легкие источники питания, действующие только в течение типичной длительности полета. Фирма Томсон продает такие устройства с источником питания, работающим в течение трех минут, работающие как генератор искусственных помех непрерывного действия с мощностью 100 Вт. Они работают в диапазоне от 6 до 19 ГГц и могут послужить основой для разработки легких устройств с коротким временем работы. Имеющийся опыт позволяет подогнать конструкцию ЛБВ к любому применению в ложных целях.

Требования к мощности определяются минимальным расстоянием от ракеты до радара, на котором больше не требуется работа ложных целей. Чем ближе ракета к радару, тем больше мощность, принимаемая радаром, и мы планируем использовать ретрансляторы, передающие маскирующие сигналы по крайней мере в 10 - 100 раз большей мощности.

Для того, чтобы определить мощность усилителя ретранслятора, мы должны знать усиление и пиковую мощность антенны радара, расстояние от ракеты до цели, поперечное сечение рассеяния ракеты, эффективную площадь приемника ретранслятора, определенную из его усиления, и усиление антенны передатчика ретранслятора. (Усиление антенны говорит нам о том, как сильно антенна фокусирует излучение в переднем направлении; поперечное сечение говорит о том, как много приходящей от радара энергии перехватывается ракетой или ложной целью и отражается обратно к радару.)

Минимальное расстояние от ракеты до цели, на котором время отклика будет слишком большим для перехвата ракеты, определяет требования к мощности передатчика. Проведенные нами детальные расчеты представлены в Приложении А.

Мы использовали значение минимальной дальности в 100 км для ракеты с дальностью в 1000 км. Мы предполагали, что пиковая мощность радара во время импульса равна 1 МВт, а размеры антенны равны $9,2 \text{ м}^2$. Это соответствует параметрам наземного радара ОПТБВ. Мы проводили расчеты для X-диапазона с рабочей длиной волны 3 см. Поперечное сечение ракеты предполагалось равным $0,1 \text{ м}^2$, а площадь антенны приемника - равной $0,0014 \text{ м}^2$ при коэффициенте усиления 2 с учетом всех потерь. ($G = 4\pi A/\lambda^2$; усиление направленной антенны больше). Для того, чтобы направить назад сигнал, в 10 раз больший сигнала от ракеты, потребуется усилитель ретранслятора с коэффициентом усиления по мощности в 34 дБ и пиковой выходной примерно в 0,4 Вт. Возможно, что в зависимости от обстоятельств можно будет использовать устройства с полупроводниковыми усилителями или с лампами бегущей волны.

СИГНАЛЫ ПЕРЕДАТЧИКА И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Сигнал, посылаемый ретранслятором, формируется по заранее определенному алгоритму. Начальное отражение происходит при $t = 0$ и представляет собой сигнал, отраженный от принимающей антенны. Этот небольшой прямой отраженный сигнал от приемника ретранслятора появляется потому, что приемник не может быть идеально согласован с нагрузкой. Через интервал времени порядка наносекунды, определяющийся физическим разделением передатчика и приемника и задержкой в усилителе, появится сигнал от передатчика ретранслятора, который будет больше из-за усиления. Это сигнал, который генерируется согласно нашему алгоритму. Он строится при помощи распределенной линии задержки, имитирующей искусственные отражения в интервале времени, соответствующем длине ракеты. Таким образом, все отраженные импульсы будут идентичными и похожими на ожидаемый возвратный сигнал радара от ракеты. В некоторых системах могут использоваться задержки с генератором случайных чисел, которые изменяют все отражаемые сигналы от каждого импульса радара к следующему импульсу. В этом случае нельзя будет произвести автокорреляционный анализ случайных отражений. Группы ложных целей могут обладать также различными фиксированными сигналами.

На рис. 6 показаны серии регистрируемых радаром возвратных сигналов от ракет и ложных целей. В верхней части рисунка иллюстрируется большая разница в длине ракеты и ложной цели. В этой иллюстрации используется временное разрешение в одну наносекунду.

Первая линия соответствует начальному отражению от приемника. Его величина будет малой из-за небольших размеров антенны и ее согласования с нагрузкой.

Вторая линия показывает задержку между приемом и ретрансляцией.

Третья линия иллюстрирует отражение от корпуса ложной цели или ракеты по отношению к начальному времени отражения ретранслятора.

Четвертая линия показывает сигналы от ретранслятора ракеты. Белые прямоугольники соответствуют случайным сигналам; черные прямоугольники соответствуют сигналам с фиксированным временем. Добавлена гладкая изменяющаяся линия, представляющая непрерывное отражение от протяженного корпуса ракеты.

Нетрудно подготовить ленту с серией возвратных сигналов, подобных показанным на рис. 6, распределенных во времени по пути приближающейся ракеты (боеголовки). Возвратные сигналы могут быть рассчитаны по известным характеристикам дифференциального поперечного сечения рассеяния излучения радара по мере приближения ракеты к радару. Такая лента может быть использована для проверки того, может ли боеголовка быть выделена разумной системой обороны.

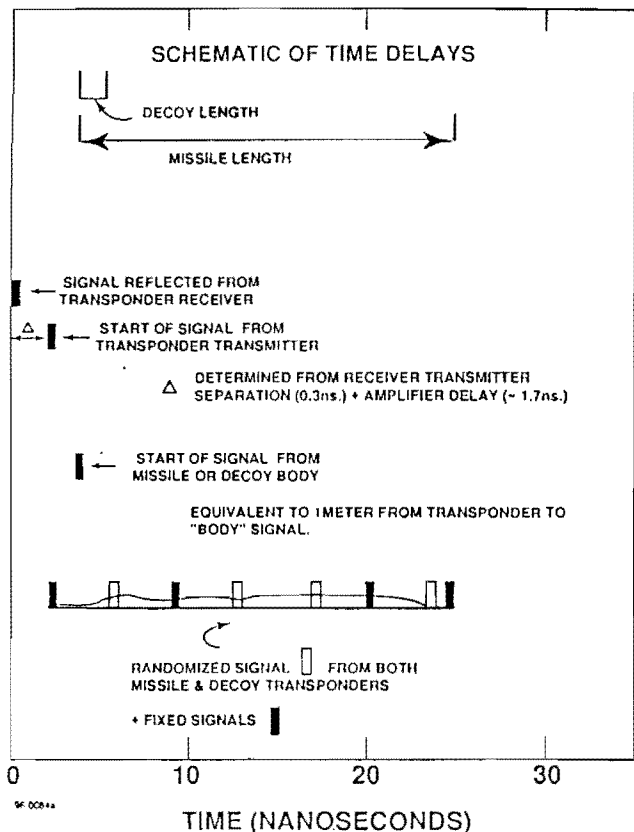


Рисунок 6: Схематическая временная последовательность и временные задержки импульсов, излученных "маскирующими станциями умышленных помех"

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали проблему противоракетной обороны за пределами атмосферы, как, например, планируется в системе ОПТБВ. Мы показали, что технически осуществимо использовать ретрансляторы, установленных в носовой части боеголовок ракет и небольших ложных целей, для возвращения мощных маскирующих сигналов, перекрывающих нормальные отраженные сигналы радара, приходящие раньше, и содержащие набор маскирующих сигналов.

Мы показали в эксперименте со спиральными и рупорными антеннами в безэховой камере, что изоляция между приемником и передатчиком ретранслятора может быть рассчитана по диаграмме направленности антенн ретранслятора. Эта изоляция, которая может быть дополнена при желании установкой металлических или поглощающих экранов между антеннами, гарантирует работу системы при очень большой мощности. Изменение возвратных сигналов от ракеты и ложных целей при помощи механических изменений и контроля отражательной способности, различных для каждой ракеты и ложной цели, также может уменьшить возможность различения ракет и ложных целей.

Кроме того, мы обнаружили, что в продаже имеются усилители и антенны малых размеров и веса, которые позволяют системе работать автоматически в широком диапазоне частот радара, возвращая к радару его рабочую частоту после усиления в линейной системе между приемником и передатчиком ретранслятора. Эти компоненты являются настолько широкополосными, что они будут эффективными в любой воображаемой будущей системе.

Применимость предлагаемой системы ложных целей не может быть поставлена под сомнение из-за того, что оценка эффективности зависит от секретной информации, поскольку метод основан только на известных законах электромагнитной теории.

В заключение мы отметим, что нет предпосылок к тому, что "умные" ложные цели в качестве контрмер

должны заменить все пассивные ложные цели. Однако они наряду с "интеллигентными" ложными целями с встроенным компьютером дают возможность добавить новое измерение в системе контрмер.

Читатель не должен рассматривать эту статью как выступление против противоракетной обороны. Неработающая оборона политически опасна и угрожает международным соглашениям по ПРО. Если перехват ракет над атмосферой не будет работать, то следует изучать другие оборонительные меры, такие, как перехват на активном участке, лазеры воздушного базирования, или уничтожение пусковых установок, при том условии, что они не станут неэффективной тратой важных оборонных ресурсов.

Если очевидно, что ложные цели эффективны за пределами атмосферы, то их поведение при входе в атмосферу представляет другую проблему, которую мы начали исследовать¹³. Поскольку корпуса наших ложных целей не обязаны имитировать поперечное сечение рассеяния боеголовки, кажется вероятным, что можно будет сделать небольшие ложные цели подходящей длины, массы и угла раскрытия носовой части, чтобы имитировать замедление боеголовки.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А
АНАЛИЗ МОЩНОСТИ УСИЛИТЕЛЯ И
КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ**

Уравнение радара для ретранслятора. Поскольку мы рассматриваем систему ложных целей, которая может воспринимать практически любую частоту, излучаемую радаром, мы проверим, как зависит от частоты отклик нашей ложной цели. Это упражнение полезно, поскольку возвратные сигналы антенны ретранслятора несколько отличаются от простого отражения от инертного устройства с обычным поперечным сечением рассеяния излучения радара. Факт независимости коэффициента усиления антенны от частоты значительно упрощает разработку.

Можно показать, что выражение для мощности, воспринимаемой приемной антенной от ретранслятора, имеет вид:

$$P = P_0(1/4\pi r^2)^2 g A_T^2 G_i^2$$

где P_0 – пиковая мощность в ваттах, r – расстояние между передатчиком и ретранслятором, g – коэффициент усиления усилителя ретранслятора, A_T – площадь антенны радара и G_i – независимый от частоты коэффициент усиления спиральной антенны ретранслятора.

Таким образом, мы продемонстрировали полезный результат, согласно которому при использовании частотно-независимых антенн ретранслятора *принимаемая мощность не зависит от λ* . Она зависит только от физического размера передатчика радара A_T и независимого от λ коэффициента усиления этих антенн G_i .

Это будет справедливо и для антенн радара, оси которых непараллельны осям антенн ретранслятора, поскольку диаграммы направленности антенн также не зависят от λ .

В случае исследованных нами спиральных антенн на угле 50° коэффициент усиления уменьшается на 5,5 дБ, а изменения диаграммы направленности в диапазоне от 3 до 18 ГГц не превышают 1 дБ.

Если угол между осью антенны радара и осью частотно-независимых антенн равен θ , то в указанном уравнении появится дополнительный множитель $G(\theta)^2$. Нормализация определяется соотношением $G(\theta = 0) = 1$.

Требования по выходной мощности ретранслятора. Необходимая для ретранслятора выходная мощность определяется соотношением:

$$P(transp) = P_0 G_T (1/4\pi r^2) g A_i = P_0 G_i (1/4\pi r^2) g A_T$$

где $P_0 = 10^6$ Вт – пиковая мощность радара, $r = 100$ км – минимальная дальность действия радара, $1/4\pi r^2 =$

$7,96 \cdot 10^{-12}$, $G_t = 2$ – коэффициент усиления антенны ретранслятора, G_r – коэффициент усиления антенны радара, g – коэффициент усиления усилителя. $P(\text{transp}) = 0,014$ Вт при $g = 100 = 20$ дБ, или 1,4 Вт при $g = 10\,000 = 40$ дБ.

Отметим также, что выходная мощность также не зависит от частоты, так что для расчета выходной мощности не требуется знания частоты.

Анализ коэффициента усиления усилителя. Рассчитаем теперь коэффициент усиления g , необходимый для того, чтобы сделать возвратный сигнал в f раз больше, чем отраженный сигнал от ракеты.

Сигнал, отраженный ракетой назад к радару, освещающему ее, равен σ . Отметим, что он зависит от ориентации ракеты или оси ретранслятора относительно направлению оси радара. Таким образом, сигнал, возвращенный к радару от ракеты или ложной цели, можно получить, заменив $A_r G_t$ на $f\sigma$, где f – отношение мощности маскирующего и отраженного сигналов. Следовательно:

$$g = \sigma f / A_r G_t = 4\pi\sigma / \lambda^2 G_t^2$$

Если мы потребуем, чтобы мощность сигнала ретранслятора в 100 раз превышала мощность отраженного сигнала от боеголовки, то мы обнаружим, что для малых боеголовок, подобных американской боеголовке Mk-21 с поперечным сечением рассеяния в $0,004$ м², требуемая мощность будет равна 0,36 Вт ($g = 32$ дБ), а для большой боеголовки CSS-4 с поперечным сечением в $0,09$ м² потребуются мощность в 8 Вт ($g = 45$ дБ).

Отметим теперь, как σ зависит от λ . Для этой цели мы используем модель цилиндра с закругленным носовым конусом. «Эффективное поперечное сечение» ретранслятора $A_r G_t$ гладко возрастает пропорционально λ^2 . Поперечное сечение радара зависит от длины волны сложным осциллирующим образом. Однако, для типичного закругленного конуса с половинным углом 15° сечение также возрастает примерно как λ^2 . На это изменение накладываются осцилляции с амплитудой ± 5 дБ при изменении отношения длины волны к радиусу закругления. Зависимость λ^2 характерна для тел с формой ракеты.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ЛОЖНЫХ ЦЕЛЕЙ

В этом приложении мы рассмотрим кинематику развертывания ложных целей в плоскости траектории ракеты и вне ее. Геометрия показана на рис. 7.

Ложные цели в плоскости траектории. Соответствующее уравнение для расстояния, на котором приземляется ложная цель, имеет вид:

$$d = v_m^2 / g \times [1 \pm (v_d / v_m) \cos(2\theta) \mp (v_d^2 / v_m^2) \sin(2\theta)]$$

где d – расстояние по прямой между пусковой установкой и целью, v_m – начальная скорость ракеты, и v_d – вектор скорости ложной цели в плоскости траектории ракеты по отношению к ракете. Он перпендикулярен скорости ракеты v_m , которая раскладывается на две компоненты – перпендикулярную поверхности Земли v_p и параллельную поверхности Земли $v_{//}$. Мы предполагаем, что Земля плоская, а ускорение свободного падения g постоянно. Угол θ представляет собой угол запуска по отношению к поверхности Земли, а d – наземная дальность. Для простоты мы предположим, что ложные цели отделяются в начале траектории, однако, легко рассчитать нужные значения скорости отделения в произвольной точке для получения того же эффекта, что и в сделанном предположении. (Перпендикулярная и горизонтальная компоненты скорости ложной цели тогда будут равны $v_n = v_m \sin \theta \pm v_d \cos \theta$ и $v_t = v_m \cos \theta \mp v_d \sin \theta$.) Отметим, что отношение v_d / v_m мало, потому что ложные цели движутся рядом с ракетой и друг с другом.

Это уравнение очень интересно, потому что линейный по v_d / v_m член исчезает при $\theta = 45^\circ$, так что поправка к d очень мала и ложные цели, летящие сверху и снизу траектории, подойдут в конце траектории к конечной точке траектории ракеты. На самом деле можно найти значение θ , близкое к 45° , где фокусировка является точной, так что последние два члена могут сократиться при $\text{ctg } 2\theta = v_d / v_m$.

Таким образом, развертывание ложных целей в плоскости орбиты приводит к тому, что ложные цели сойдутся в одной точке прицеливания, даже если они будут лететь на разных высотах. Поэтому оборона не может использовать точку прицеливания для различения ложных целей и боеголовки.

Ложные цели вне плоскости траектории. Если v_d перпендикулярно к плоскости, то время полета не будет зависеть от поперечного импульса при любом импульсе ложной цели, поскольку $v_d \cdot v_m = 0$. Теперь точка приземления будет находиться на линии, перпендикулярной к пути ракеты и при любом угле θ поперечное смещение будет равно $(v_d / v_m) d$. Следовательно, вдали от 45° , где $\cos 2\theta$ исчезает, разброс дальности для ложных целей в плоскости траектории и поперечное смещение для ложных целей вне плоскости траектории будут примерно одинаковы и пропорциональны v_d / v_m .

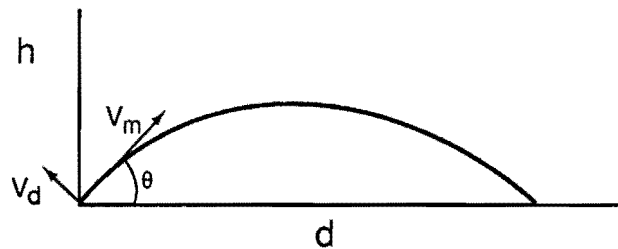


Рисунок 7: Геометрия траектории ракеты.

ПРИЛОЖЕНИЕ В ПОДАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ CHIRP

Сжатие импульса. Если в радаре используется метод частотной модуляции CHIRP, в котором применяется длинный импульс с небольшой пиковой мощностью для получения хорошего временного разрешения, по такую систему можно будет легко подавить при небольшом изменении схемы ретранслятора. В этом методе используется длинный частотно-модулированный импульс, а принимаемый отраженный сигнал пропускается через частотно-зависимую линию задержки, компенсирующую частотную модуляцию. Фактически низкочастотные сигналы в начале импульса задерживаются, чтобы совместиться с высокочастотными сигналами в конце импульса. Если длительность импульса радара составляет 1 мксек, то требуется большое время задержки. Однако, чтобы размазать ложную цель длиной 1 метр так, чтобы она выглядела как ракета длиной в 5 метров, потребуется весьма небольшая частотно-зависимая линия задержки в ретрансляторе, с возможностью небольшой задержки в 25 нсек. Небольшая частотно-зависимая линия задержки, параметры которой неизвестны радару, размажет временное разрешение так, что малую ложную цель нельзя будет отличить от большой ракеты. Это технически просто, и не нужно оснащать таким образом все ретрансляторы на ложных целях. Конечно, в любом случае ретрансляторы будут маскировать возвратные сигналы, так что этот метод будет всего лишь улучшением.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПАССИВНЫМ И
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ЛОЖНЫМ ЦЕЛЯМ

В опубликованном почти десять лет назад отчете Американского физического общества (АФО) по Стратегической оборонной инициативе¹⁴ основное внимание уделялось оружию направленной энергии, а ложные цели упоминались лишь вкратце по ссылкам на секретную информацию, предоставленную рабочей группе АФО. Однако, применение ложных целей является очевидной и часто обсуждавшейся контрмерой. В одном из методов предлагалось использовать ложные цели-баллоны, в один из которых помещается боеголовка¹⁵. В другом классическом методе используется большое количество отражателей из алюминия, возможно, в форме угловых отражателей, которые располагаются вдоль траектории ракеты для маскировки отраженных сигналов. Однако, хорошее разрешение по дальности, например, использование системы CHIRP с частотной линией задержки, может позволить отличить их от ракеты.

Необходимо использовать ложные цели с поперечным сечением рассеяния, имитирующем ракету. Этого можно добиться, используя короткие ложные цели с телескопическими секциями, развертываемыми после отделения для имитации формы боеголовки или ракеты. В этом случае они не только будут похожи на боеголовку по сечению рассеяния, но и наблюдения с высоким разрешением по дальности не смогут отличить ложные цели от боеголовок. На корпусе ракеты также можно будет расположить выступы, имитирующие отражение от телескопических секций, и делающие ракету похожей на ложную цель.

Узи Рабин из Министерства обороны Израиля и Азриэль Лорберт из Министерства науки и техники Израиля в своем последнем обзоре по противоракетной обороне на восьмой международной конференции по противоракетной обороне на театре военных действий в июне 1995 года в Лондоне заявили, что «...наиболее вероятной контрмерой, которая может появиться на будущем ближневосточном поле боя в течение ближайших 15 лет, являются простые одноцелевые ложные цели.» Они отметили также, что «имеется некоторая вероятность того, что в конце этого обзорного периода могут появиться электронные контрмеры малой мощности.»

С каждым появлением новой микросхемы фирмы «Интел» и новой потребительской техники (такой, как сотовые телефоны, пейджеры, приемники системы «Навстар» с точностью определения положения до нескольких метров, и т.д.) мы убеждаемся в гигантской вычислительной мощности простых и дешевых микросхемах. Специально разработанные микросхемы-компьютеры могут превратить ложную цель в интеллектуальную систему электронного противодействия.

Информация о положении радаров обороняющейся стороны и их частоте могут быть введены в компьютер в полевых условиях, или сами приемники ретранслятора могут обнаружить радары на ранних стадиях полета и накопить эту информацию. Эта информация позволит

предсказать параметры сигнала, который будет получать радар в любой момент времени вдоль траектории полета и контролировать электронным способом усиление усилителя ретранслятора для улучшения параметров маскировки. Можно даже подстроить ретранслятор к точному угловому распределению отраженного сигнала ракеты. Такая вычислительная мощность компьютера предоставляет интересную возможность связи между боеголовкой и ложными целями для решения проблем входа в атмосферу.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Десять лет назад, во время проведения программы СОИ, почти все понимали, что ложные цели могут сыграть важную роль. Исследование СОИ Американским физическим обществом в апреле 1987 г. не содержало детального исследования ложных целей, в частности, потому, что такие контрмеры считались весьма секретными. Тем не менее, в нем отмечалось, что ложные цели могут быть сделаны очень легкими.
2. Мы будем применять термин ракета как для ракеты-носителя, доставляющей боеголовку, так и для самой боеголовки.
3. Майкл Касдан и Джошуа Раха. В их дипломных работах приводятся результаты исследований технической осуществимости, выполненных в Пенсильванском университете.
4. Абрахам Фридман и Филип Фарнум.
5. Мы хотели бы поблагодарить профессора Набила Фархата за проведение наших исследований на его беззховой камере.
6. Спиральные антенны были предоставлены Оборонной компанией AEL в Лэнсдэйле, Пенсильвания.
7. Мы хотели бы поблагодарить компанию Локхид-Мартин за аренду их спектрального анализатора Хьюлет-Паккард 8620, крайне важного для наших измерений.
8. Дональд Карлсон из Инженерной школы Мура оказал большую помощь, предоставив оборудование, полезное для наших лабораторных измерений.
9. Этот подход известен как "антимоделирование" - концепция, которая разрабатывалась ранее Р.Л. Гарвином.
10. Amin, R.B., and J.R. James, *The Radio and Electronic Engineer*, Vol. 51, p. 208, (1981).
11. Мы хотели бы поблагодарить д-ра Джорджа Сана из Оборонной корпорации AEL за организацию передачи спиральных антенн, использовавшихся в нашем эксперименте.
12. Угловые отражатели обсуждаются в *Antenna Engineering Handbook*, R.C. Johnson, H. Jasik, McGraw-Hill, (1984), p. 40-19.
13. Frankel, S., "Endoatmospheric Decoys", I/P Report 9610.
14. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 59, p. 3 (July 1987).
15. Р.Л. Гарвин, см. ссылку 9.
16. AIAA - Collection of Papers ISBN-1-56357-187-6.