

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРОНЫ ОТ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

Дин А. Уилкенинг

В статье разрабатывается вероятностная модель, которую можно использовать для определения технических характеристик, требуемых для обороны, удовлетворяющей конкретным военно-политическим целям. Цель обороны устанавливается в виде некоторой вероятности отсутствия проникновения боеголовок через оборонительную систему. Технические характеристики определяются вероятностью поражения при одном пуске перехватчика, а также вероятностями обнаружения боеголовки, слежения и классификации. Нападение характеризуется численностью боеголовок и неотождествленных ложных целей. Изучаются режимы заградительного огня и стрельбы с корректировкой и выводится оптимальное выделение перехватчиков на каждую цель для последнего случая. Обсуждаются приложения этой модели для определения размеров национальной противоракетной обороны (ПРО) и ПРО на театре военных действий.

Автор – директор научной программы в Центре по международной безопасности и сотрудничеству при Стэнфордском университете, Стэнфорд, Калифорния, США.

ВВЕДЕНИЕ

В современных спорах относительно противоракетной обороны (ПРО), как и в столь многочисленных общественных политических спорах, следует понимать связь между ресурсами, выделенными на конкретную задачу, и целями, которые хотелось бы осуществить.

Отсюда вытекает неуываемый вопрос: "Сколько же достаточно?" и, в частности, "Сколько потребуется иметь национальной ПРО (НПРО) или ПРО на театре военных действий (ТВД) для достижения конкретных военно-политических целей при заданном уровне технических характеристик оборонительной системы?" С учетом растущего политического давления в США с целью развертывания в следующем десятилетии как НПРО, так и ПРО на ТВД интерес к этому вопросу выходит за рамки чисто академического.

Однако, поскольку трудно отождествить с какой либо определенностью технические характеристики будущих систем ПРО, а в то же время существуют планы по масштабам развертывания будущей ПРО (например, НПРО с 20-100 перехватчиками, расположенными в одном месте, и ПРО на ТВД с примерно 1200 перехватчиками типа ТХААД - Theater High-Altitude Area Defense - и/или с 650 высотными перехватчиками для ПРО на морском ТВД НТВ - Navy Theater-Wide), лучше несколько перевернуть этот вопрос так: "Какому уровню технических характеристик должны удовлетворять оборонительные системы, если существующие программы нацелены на удовлетворение полезных военно-политических задач?" В этой статье развивается простая модель ПРО для ответа на поставленные вопросы и для предоставления рамок, в пределах которых можно конкретно сравнивать различные ожидания в отношении эффективности систем ПРО.

Статья начинается с короткого обсуждения задач обороны. Затем проблема обороны с перехватчиками рассматривается как проблема испытаний Бернулли. Далее изучается вероятность поражения цели – это основной параметр в модели испытаний Бернулли. Продолжение статьи связано с определением размера обороны, требуемого для удовлетворения критериям ее обороноспособности в рамках доктрины сплошного оборонительного огня или подхода с корректировкой огня. Представлено также оптимальное выделение на каждую цель перехватчиков для второго варианта. Наконец, в статье приводятся два примера возможного приложения модели: НПРО и ПРО на ТВД. В модель не включены финансовые затраты, хотя их можно добавить, если есть желание изучить степень удовлетворения разным задачам обороны в рамках конкретных финансовых ограничений.

Можно представить несколько правдоподобных задач ПРО, например, полное блокирование нападения данного масштаба, ослабление нападения в некоторое число раз или защита некоторых целей (с выживанием заданного процента обороняемых целей при конкретном нападении). Выбранный для нашей модели критерий заключается в том, что оборона уничтожает все атакующие боеголовки с определенной вероятностью, поскольку текущие дебаты по поводу ПРО большей частью определены тревогой распространения оружия массового уничтожения. Это очень строгий критерий. Модель можно подогнать под критерий, допускающий некоторое просачивание. Но получающиеся формулы более сложны.

Поэтому, например, можно задать, что НПРО полностью блокирует с вероятностью 0.80 небольшие по масштабу случайные и несанкционированные атаки или небольшие преднамеренные угрозы со стороны враждебных стран, куда в будущем может распространиться технология баллистических ракет большой дальности. В соответствии с планами Организации ПРО (ОПРО) системы НПРО США должны быть спроектированы так, чтобы оказаться эффективными против нападений с участием 4-20 входящих в атмосферу боеголовок, сопровождаемых различными наборами средств проникновения¹. Кроме того, предполагается, что системы НПРО будут удовлетворять следующим критериям: 95-процентная уверенность уничтожения 95% атакующих средств в предположении стрельбы четырьмя перехватчиками по каждой налетающей цели². Если интерпретировать вероятность 0.95 как то, что только одна из 20 атакующих боеголовок пройдет через оборону, этот критерий эквивалентен вероятности 0.67 полного перехвата всех 20 нападающих боеголовок, если полагать, что вероятность поражения одной боеголовки одна и та же применительно ко всем участвующим в атаке боеголовкам.

Задачей ПРО на ТВД является защита военных сил США и их союзников, а также союзных городов. Последнее требует более строгого критерия обороны³. Если лидеры союзников будет полагаться на оборону для защиты городов, а не на сдерживание, они потребуют очень хорошие тактико-технические характеристики обороны. Например, от ПРО на ТВД можно потребовать достигнуть вероятности 50% таких случаев, когда ни одна боеголовка не упадет на союзные города. На первый взгляд, это может показаться плохой обороноспособностью. Но это требовательный критерий, поскольку он приложим к полной длительности гипотетической войны, то есть к арсеналу ракет малой и средней дальности противника, а не к единичной атаке, как в случае приведенного выше примера с НПРО. Более того, арсенал ракет для ТВД может содержать 50-200 ракет⁴. Поэтому такой критерий утверждает, что не должно быть более высокого, чем 50-50, шанса для одной боеголовки проникнуть через оборону даже в случае запуска всего арсенала нападающей стороны на один город. Такая оборона сделает ТВД-ракеты тактически бесполезными и стратегически маргинальными.

ОБОРОНА КАК ПРОБЛЕМА ИСПЫТАНИЙ БЕРНУЛЛИ

Трудно подсчитать эффективность систем ПРО и, следовательно, масштаб обороны, требуемой для удовлетворения определенным техническим критериям обороноспособности, без детального понимания входящих в состав обороны датчиков и перехватчиков, а также без составления детальных характеристик тех целей, которые собирается сбивать оборона. Тем не менее, можно разработать простую параметрическую модель, которая даст приблизительные результаты при простых предположениях о технических характеристиках обороны. Эта модель, в свою очередь, можно применить для получения представления об уровне тактико-технических характеристик, который надо достигнуть, чтобы системы ПРО обеспечили значительную военную (если не политическую) защиту от ядерной, биологической и химической угроз⁵.

В ракетной атаке могут принимать участие боеголовки и ложные цели. Ложные цели можно частично отделить от боеголовок в зависимости от соотношения их признаков (например, инфракрасные характеристики, радарное поперечное сечение и т.д.). На рис.1 рассмотрена такая ситуация с некоторым пороговым значением дискриминирующей системы в случае, когда выделение ложной цели оказывается относительно неполным. На практике оборона может обладать ограниченной информацией о признаках боеголовок и ложных целей.

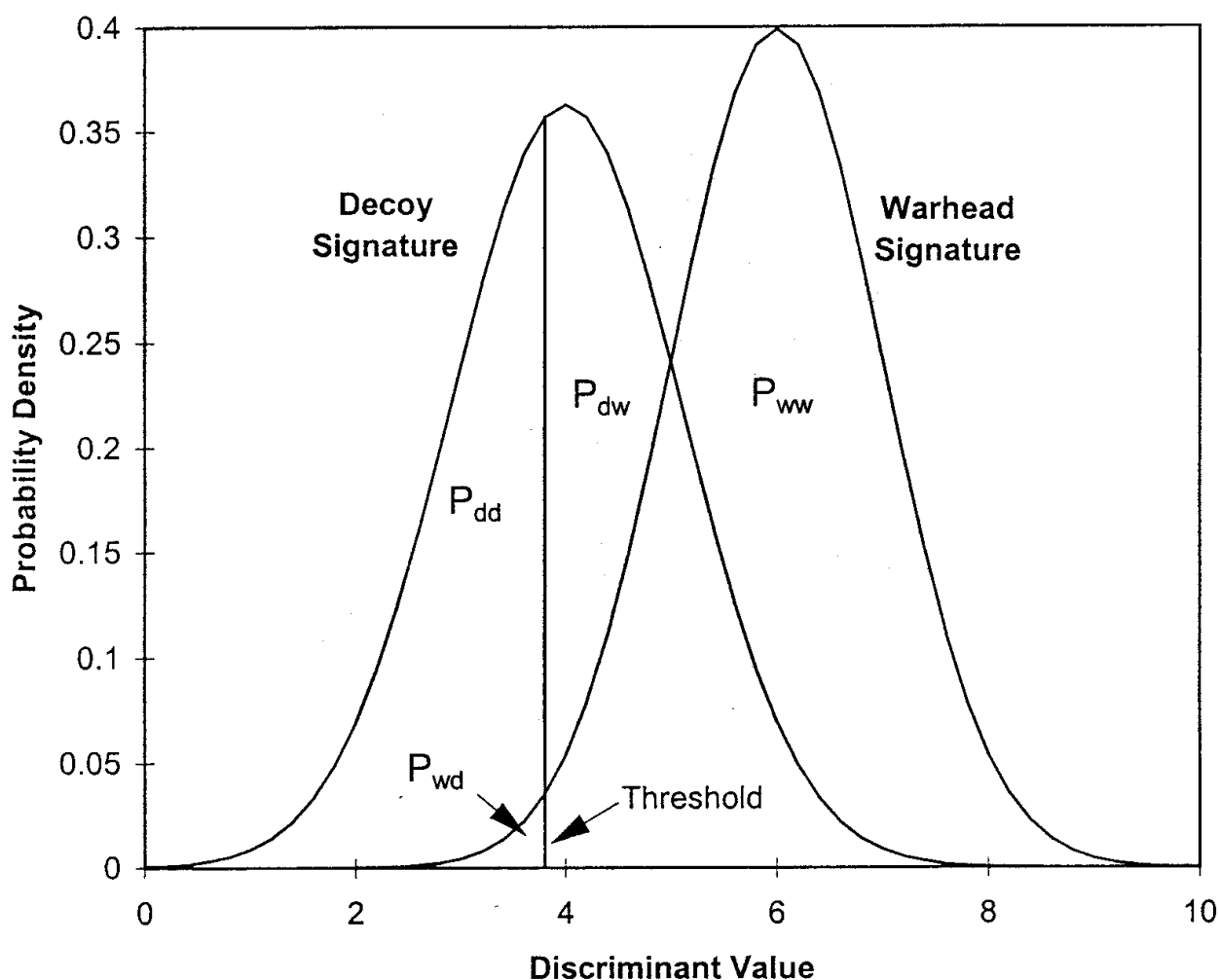


Рисунок 1. Дискриминация ложных целей. По оси абсцисс отложены значения дискриминирующей системы, по оси ординат – вероятность. Левый пик относится к ложной цели, а правый – к боеголовке. Указан порог дискриминации. Остальные обозначения поясняются в тексте.

Хотя оценки некоторых из этих признаков можно вычислить на основе общих законов физики, нужны наблюдения за испытаниями баллистических ракет соперника, чтобы получить детальную информацию. Однако такое слежение совсем необязательно окажется простым делом особенно для ракет малой дальности, что подтверждается неудачей разведывательной общественности США при попытке точно проследить за запуском северокорейской ракеты "Теподонг 1" 31 августа 1998 г., когда намечался вывод спутника на орбиту⁶. Более того, распространение технологии баллистических ракет может сопровождаться уменьшением испытаний и, следовательно, менее точными данными по сравнению с программами разработки баллистических ракет в США и России⁷. Столкнувшись с незначительной информацией о вероятных признаках боеголовок и ложных целей, оборона может оказаться вынужденной установить достаточно низкий порог дискриминации, чтобы обеспечить эффективное обнаружение боеголовок, усложняя тем самым проблему дискриминации ложных целей.

Тем не менее, в принципе из рис.1 можно получить четыре значения вероятности: вероятность P_{ww} того, что боеголовка действительно классифицируется как боеголовка (это интеграл от признака боеголовки по области справа от порога); вероятность P_{wd} того, что боеголовка классифицируется как ложная цель (это интеграл от признака боеголовки по области слева от порога); вероятность P_{dd} того, что ложная цель классифицируется как ложная цель (это интеграл от признака ложной цели по области слева от порога) и вероятность P_{dw}

того, что ложная цель классифицируется как боеголовка (это интеграл от признака ложной цели по области справа от порога). P_{wd} представляет ошибку первого типа, а P_{dw} - ошибку второго типа в процессе выделения ложной цели. Отметим, что $P_{ww} = 1 - P_{wd}$, а $P_{dd} = 1 - P_{dw}$. Если имеется W боеголовок и D ложных целей, то кажущееся число W^* боеголовок, участвующих в нападении, дается выражением

$$W^* = P_{ww}W + P_{dw}D \quad (1)$$

то есть, это число целей, которые должны быть перехвачены обороной.

Есть два пути просачивания боеголовок через оборону: (1) боеголовка классифицируется как боеголовка, но не сбивается обороной, и (2) боеголовка классифицируется как ложная цель и свободно пропускается. Очевидно, что порог дискриминации должен быть установлен так, чтобы сделать величину P_{wd} настолько малой, насколько это возможно, но понимая при этом, что при понижении порога больше ложных целей будут выглядеть как боеголовки (так как вырастет P_{dw}). Вероятность q того, что боеголовка проникнет через оборону, дается выражением

$$Q = P_{wd} + P_{ww}(1 - K_w^*) = 1 - P_{ww}K_w^* \quad (2)$$

где K_w^* - условная вероятность того, что оборона сойдет боеголовку, которая классифицирована как боеголовка. Введем новое определение

$$K_w = P_{ww}K_w^* \quad (3)$$

где K_w - вероятность того, что боеголовка обнаружена и уничтожена обороной.

Оборона, основанная на перехватчиках, может быть промоделирована как проблема испытаний Бернулли, где вероятность $P(x)$ того, что x атакующих боеголовок (или ракет) пройдут через оборону, дается биномиальным распределением

$$P(x) = \binom{W}{x} q^x (1-q)^{W-x} = \binom{W}{x} (1-K_w)^x (K_w)^{W-x} = \frac{W!}{x!(W-x)!} (1-K_w)^x K_w^{W-x} \quad (4)$$

где K_w считается одинаковым для всех боеголовок, а W - число участвующих в нападении боеголовок. В том случае, когда оборона сбивает все боеголовки (то есть $x=0$), уравнение (4) сводится к виду

$$P(0) = (K_w)^W \quad (5)$$

как и можно было ожидать. На рис.2 показано распределение этой вероятности в зависимости от числа участвующих в атаке боеголовок при разных значениях K_w . Если критерий обороноспособности устанавливает, что число боеголовок, прошедших сквозь оборону должно быть не более L , вероятность такого события дается выражением

$$P(\leq L) = \sum_{x=0}^L P(x) \quad (6)$$

ВЕРОЯТНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЦЕЛИ

Вероятность события, когда можно уничтожить одиночную боеголовку, или цель, дается в самом общем виде следующим уравнением

$$K_j = [1 - P_j(\text{cmf})]P_j(k|\text{ncmf})$$

где K_j - вероятность того что цель j -го типа (боеголовка или ложная цель) уничтожается, $P_j(\text{cmf})$ вероятность того, что все выстрелы, произведенные по цели, страдают от одного общего недостатка (common mode failure), а $P(k|\text{ncmf})$ - вероятность того, что оборона сможет сбить цель j -го типа при отсутствии таких общих недостатков.

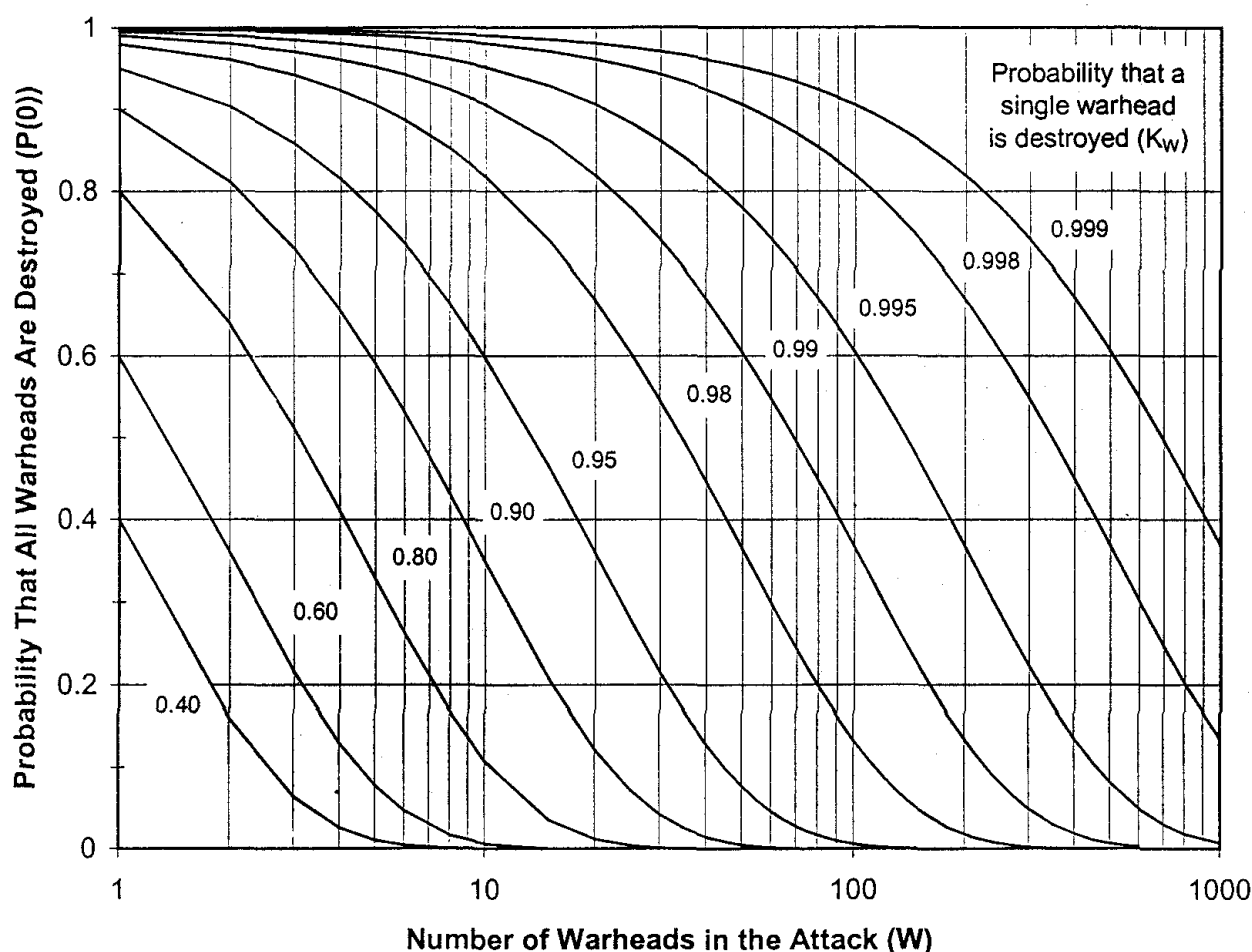


Рисунок 2. Вероятность уничтожения всех боеголовок в зависимости от масштаба нападения. По оси абсцисс отложено число атакующих боеголовок W , по оси ординат – вероятность уничтожения всех боеголовок $P(0)$. Параметром служит вероятность уничтожения одной боеголовки K_w .

Среди примеров недостатков общего типа сбой при обнаружении цели и точном слежении за ней, неправильная классификация боеголовки как ложной цели, надежность системы ПРО, отвечающей за команды и контроль (например, сбой при передаче перехватчикам данных о курсе цели) ⁸. Вероятность поражения цели можно перезаписать в виде

$$K_j = P_j(\text{track})P_j(\text{kill}/\text{track}) \quad (7)$$

где все источники недостатков общего типа включены в $P_j(\text{track})$:

$$P_j(\text{track}) = P_{\text{det\&track}} \cdot P_{\text{classify}} \cdot P_{\text{rel}} \quad (8)$$

где $P_{\text{det\&track}}$ - вероятность обнаружения цели и успешного отслеживания с достаточной точностью для передачи данных перехватчику обороны, P_{classify} - вероятность того, что боеголовка или ложная цель будут классифицированы как боеголовка (P_{ww} для боеголовок и P_{dw} для ложных целей) и P_{rel} - это та часть надежности оборонительной системы, которая влияет на все выстрелы, выполненные обороной.

Условная вероятность $P_j(kill/track)$ уничтожения цели j -го типа при успешном слежении дается выражением

$$P_j(kill/track) = 1 - (1 - k_{j1})(1 - k_{j2}) \dots (1 - k_{jn}) \quad (9)$$

для обороны, стреляющей несколько раз по одной цели, где k_{ji} - условная вероятность поражения цели одним выстрелом (SSPK – single-shot probability kill) для цели j -го типа, относящаяся к i -му выстрелу при условии, что все предыдущие выстрелы не сумели поразить цель. Полное число выстрелов по каждой цели дается числом n . Обратите внимание, что это уравнение верно, когда выстрелы статистически зависимы. Такая статистическая зависимость может возникнуть по ряду причин.

Например, если i -й выстрел не разрушил цель, но сбил ее с курса или изменил ее признак, то последующие выстрелы могут иметь больше или меньше шансов разрушить цель. Или еще – если по налетающим целям производится массовый огонь, SSPK последующих выстрелов может упасть, потому что контролирующий стрельбу радар не имеет возможности осуществлять слежение и связываться сразу со многими перехватчиками одновременно с их вылетом. Если большое число целей одновременно входит в зону, которую покрывает оборонительный радар, эта проблема ухудшается⁹. Наконец, уравнение (9) предполагает, что SSPK перехватчика не меняется по всему обороняемому району, что может не всегда быть верным, так как SSPK может уменьшаться по мере того, чем дальше перехватчик должен долететь до своей цели.

Если принять, что выстрелы статистически независимы и имеют идентичные SSPK, то приведенное выше уравнение (9) сводится к виду

$$P_j(kill/track) = 1 - (1 - k_j)^n = 1 - I_j^n \quad (10)$$

где k_j - это SSPK, связанная с каждым выстрелом по цели j -го типа, $I_j = 1 - k_j$ - степень проникновения сквозь оборону для каждого выстрела, а n - число выстрелов, предпринятых по каждой цели j -го типа. Ту же самую формулу можно использовать в качестве приближения для статистически зависимых выстрелов, если определить I_j как среднее геометрическое от степеней проникновения для статистически зависимых выстрелов. Поэтому вероятность поражения обороной K_j можно записать в виде

$$K_j = P_j(track)[1 - (1 - k_j)^n] = P_j(track)(1 - I_j^n) \quad (11)$$

Существование недостатков общего типа подразумевает, что нельзя добиться безграничных улучшений эффективности обороны путем простого увеличения числа перехватчиков.

Нынешние проектировщики ПРО явно ожидают, что величина SSPK перехватчика будет лежать в пределах 0.80-0.85¹⁰. Хотя это может оказаться реальным для одиночных боеголовок без мер противодействия, столь высокие значения SSPK будет трудно получить при наличии мер противодействия, хотя столь же трудно оценить, насколько могут снизиться значения SSPK. Похоже, что SSPK против ложных целей отличны от SSPK против боеголовок в зависимости от типа ложной цели. Кроме того, если оптимистично относиться к технологиям появляющихся датчиков, то должна быть осуществимой архитектура датчиков, противостоящая простым ракетным угрозам и имеющая значения $P(track)$ выше 0.95 и возможно выше 0.99¹¹. Скажем еще раз, что важный вопрос заключается в том, сколь велико может быть значение $P(track)$ в присутствии мер противодействия противника.

МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Одним из наиболее значительных недавних успехов в области ПРО стало появление перехватчиков с ударным (механическим) поражением. Это та критичная технология, на которую полагается большинство новых перехватчиков ПРО. Другими критичными технологиями ПРО стали радары и инфракрасные датчики для обнаружения ракет и боеголовок, отслеживания и дискриминации ложных целей. Достигнутый за последнее десятилетие успех

в радарх (например, "изображающий радар" с очень хорошим разрешением по расстоянию) и в оптических датчиках (например, длинноволновые инфракрасные датчики) может сделать возможным проведение дискриминации некоторых ложных целей и обломков носителя от боеголовок особенно в том случае, если комбинировать данные с обоих датчиков. Тем не менее, дискриминация ложных целей остается, возможно, самым крупным техническим вызовом в отношении эффективной ПРО.

Меры противодействия ПРО могут быть сгруппированы по следующим категориям: введение в заблуждение (то есть, использование средств доставки, отличных от баллистических ракет), подавление обороны (то есть, прямое нападение на оборону), насыщение (использование большого числа баллистических ракет или ложных целей) и качественные улучшения средств нападения (например, количественное уменьшение признаков ракет или боеголовок). Обсуждаемая в данной статье модель может параметрически приспособиться к двум последним и к неразрушающим формам подавления обороны (то есть, к глушилкам). В частности, меры противодействия объединены в модель, в соответствии с которой они уменьшают вероятность успешного обнаружения цели и слежения за ней (тем самым откладывая запуск перехватчика и вызывая сужение обороняемого района или же вообще предотвращая запуск), уменьшают SSPK перехватчика после его запуска или же просто подавляют оборону слишком большим числом целей. Примерами мер противодействия, уменьшающих $P(\text{track})$, служат технологии "невидимок", которые уменьшают радарное поперечное сечение, глушение радаров или инфракрасных датчиков, что приводит к возрастанию уровня шумов в датчиках, а также крупная одновременная нагрузка на оборону, насыщающая возможности обороны по слежению и контролю за выстрелами (то есть, насыщение оборонительного "боевого пространства").

Мерами противодействия, уменьшающими SSPK внеатмосферного перехватчика, служат методики охлаждения боеголовок, в результате чего инфракрасные датчики ударного блока не смогут увидеть свои цели (холодные боеголовки), или помещение боеголовок внутри больших баллонов, что препятствует точному определению положения боеголовки и приводит к промаху перехватчика мимо своей настоящей цели. Маневрирующие боеголовки могут ухудшить SSPK перехватчика, действующего в пределах атмосферы¹².

Наконец, оборону можно насытить большим числом ложных целей, которые нельзя отличить от боеголовок (то есть, при больших значениях P_{dwD}), большим числом боеголовок, направленных на разные цели, от мирвированных ракет или же большим количеством боеприпасов с биологическим и химическим оружием (БХО). Распадающиеся на отдельные блоки полезные нагрузки с БХО вызывают одну из наиболее трудных для ответа тревог для ПРО на ТВД, поскольку на каждой ракете можно разместить десятки или сотни бомбочек. Боеприпасы с БХО представляют больше затруднений для баллистических ракет большой дальности, поскольку трудно обеспечить достаточную теплозащиту БХО агентов от разрушения во время нагрева при входе в атмосферу. Боеприпасы с БХО трудно обнаружить и за ними трудно следить из-за их малого радарного поперечного сечения, но даже при обнаружении может оказаться затруднительным ударный перехват после разделения целей из-за небольшого размера каждого блока¹³. Обломки носителя также могут оказаться внеатмосферными ложными целями, хотя, как указывалось ранее, изображающие радары могут оказаться способными отличить некоторые из них от боеголовок.

Война в Персидском заливе 1991 г. дала пример мер противодействия ПРО, когда обломки носителя и непреднамеренное маневрирование плохо сконструированных ракет "Эль Хуссейн" подорвали оборонительную эффективность "Патриотов" (ПАК-2). SSPK у ПАК-2 была, вероятно, много ниже начальных оценок (в диапазоне 0.09-0.25, а, может быть, и ниже). Это продемонстрировало, что сюрпризы на поле боя могут уменьшить SSPK ниже тех величин, которые основывались только на инженерных расчетах и на данных от испытаний¹⁴.

Важно заметить, что современная угроза баллистических ракет на ТВД, как считается, основана большей частью на одиночных боеголовках, поскольку иракскими баллистическими ракетами во время войны в Персидском заливе не были использованы преднамеренные меры противодействия. Никаких подобных действий не наблюдалось после этого при испытаниях ракет для ТВД среди развивающихся стран, по крайней мере (хотя такие испытания могут пройти незамеченными)¹⁵. Неясно также, когда могут появиться ложные цели или иные меры противодействия, хотя кажется разумным предположить, что они появятся,

поскольку такие меры противодействия, не будучи тривиальными, вероятно находятся в пределах достижимого для большинства стран, имеющих возможность производить баллистические ракеты кустарными методами. Например, в одном из исследований утверждается, что умеренное изменение формы траектории (переход на навесные или настильные траектории), простые внеатмосферные ложные цели или мелкий мусор, ракеты или боеголовки, намеренно производящие маневры с закруткой в пределах атмосферы, и электронные меры противодействия малой мощности для заглушки управляемых радарными перехватчиков могут появиться до 2010 г., хотя и отмечается, что более сложные ложные цели, имитирующие радарные и инфракрасные признаки боеголовок (особенно при спуске в атмосфере), невидимые ракеты или головные части, сложное маневрирование в атмосфере (особенно для разделяющихся боеголовок), электронные меры противодействия против наземных радаров и разделяющиеся боеголовки (например, с боеприпасами с БХО), как кажется, находятся за пределами технических возможностей развивающихся ракетных стран, по крайней мере, на Ближнем Востоке¹⁶.

В любом случае результат длительного состязания обороны с нападением, мер с противомерами трудно определить. С одной стороны, нападение часто имеет право на последний ход, если предположить, что не обладающие большим опытом соперники могут оказаться способными разработать простые меры противодействия после того, как оборона развернута. Более того, сюрпризы такого типа всегда возможны, как показал опыт войны в Персидском заливе. С другой стороны, США обладают гораздо большими техническими и финансовыми ресурсами по сравнению с большинством региональных противников. Поэтому, если США будут время от времени улучшать свою ПРО с учетом известных мер противодействия, а также мер, разработанных американскими специалистами, то возможно создание в результате надежной ПРО по отношению к тем мерам противодействия, которые могли бы разработать Северная Корея, Ливия, Сирия, Иран и Ирак, хотя это вряд ли окажется справедливым для российских или китайских мер противодействия. Например, как сообщалось, при испытаниях двух прототипов внеатмосферных ударных перехватчиков НПРО от действительных головных частей отличались "ложные цели, легкие модели и средства противодействия", более сложные, чем те, которые могли бы разработать развивающиеся ракетные страны, хотя правоту этого утверждения трудно доказать¹⁷. Кроме того США и Англия потратили годы на разработку мер противодействия, которые, как они считали, эффективны против относительно несложных радаров системы ПРО вокруг Москвы¹⁸. В архитектуру американских датчиков входят не только инфракрасные датчики, но и множество радарных площадок, которые способствуют дискриминации ложных целей путем наблюдения за целью под разными углами.

Конкретная техническая оценка этих мер противодействия и соответствующих антимер со стороны ПРО выходит за пределы этой статьи. Достаточно сказать, что эффективность систем ПРО по отношению к простым угрозам (то есть, единичным боеголовкам) может быть довольно хорошей, если допустить, что адекватное тестирование сможет решить инженерные проблемы, которые мучают нынешнее поколение перехватчиков с ударным поражением. Однако эффективность ПРО против будущих угроз менее очевидна и она будет зависеть во многом от возможности преодолеть меры противодействия нападающей стороны тех типов, которые упоминались ранее. Воздействие мер противодействия включено в последующий анализ, где разбираются вариации эффективности обороны в зависимости от вариации параметров обнаружения боеголовки, вероятности слежения, SSPK перехватчика и числа ложных целей, которых нельзя отличить от боеголовок.

ОБОРОНА, ТРЕБУЕМАЯ ДЛЯ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ КРИТЕРИЮ ВЫПОЛНИМОСТИ

В дальнейшем можно вывести число выстрелов, которые надо произвести по каждой налетающей боеголовке для достижения заданного уровня эффективности обороны. Детали расчетов объясняются в Приложении. На рис.3 показано минимальное число перехватчиков, которое надо затратить на каждую кажущуюся боеголовку, в зависимости от числа нападающих боеголовок при разных долях α (это та доля кажущихся боеголовок, которая относится к реальным боеголовкам). Число перехватчиков на кажущуюся боеголовку приведено для заградительного режима огня и для режима с корректировкой огня. В первом случае n перехватчиков стреляют почти одновременно по каждой налетающей цели. Во втором слу-

чае обычно на каждую налетающую цель запускается один перехватчик, а остальные выстрелы направляются только на те боеголовки и ложные цели, которые остались неповрежденными в результате первого выстрела. Вероятность поражения перехватчиком в одном выстреле (SSPK) принята равной 0.7 для боеголовок и только треть этого значения отводится на ложные цели. Вероятность $P(track)$ равна 0.99 и критерий обороны состоит в 80%-ной вероятности поражения всех напавших боеголовок. График прерывается при участии в атаке более 22 боеголовок, поскольку уже нельзя удовлетворить критерию полного поражения всех боеголовок с вероятностью 0.80. На рис.4 приведен такой же набор кривых при почти идеальном обнаружении, отслеживании и классификации боеголовок (то есть, $P(track) = 0.999$). Обратите внимание, что доктрина стрельбы с корректировкой огня становится менее эффективной по мере увеличения числа неотличаемых ложных целей, участвующих в нападении. Действительно, в предельном случае, когда $k_d \rightarrow 0$ и $D \rightarrow \infty$, оптимальный вариант стрельбы второго типа эквивалентен заградительному варианту, чего и можно было ожидать.

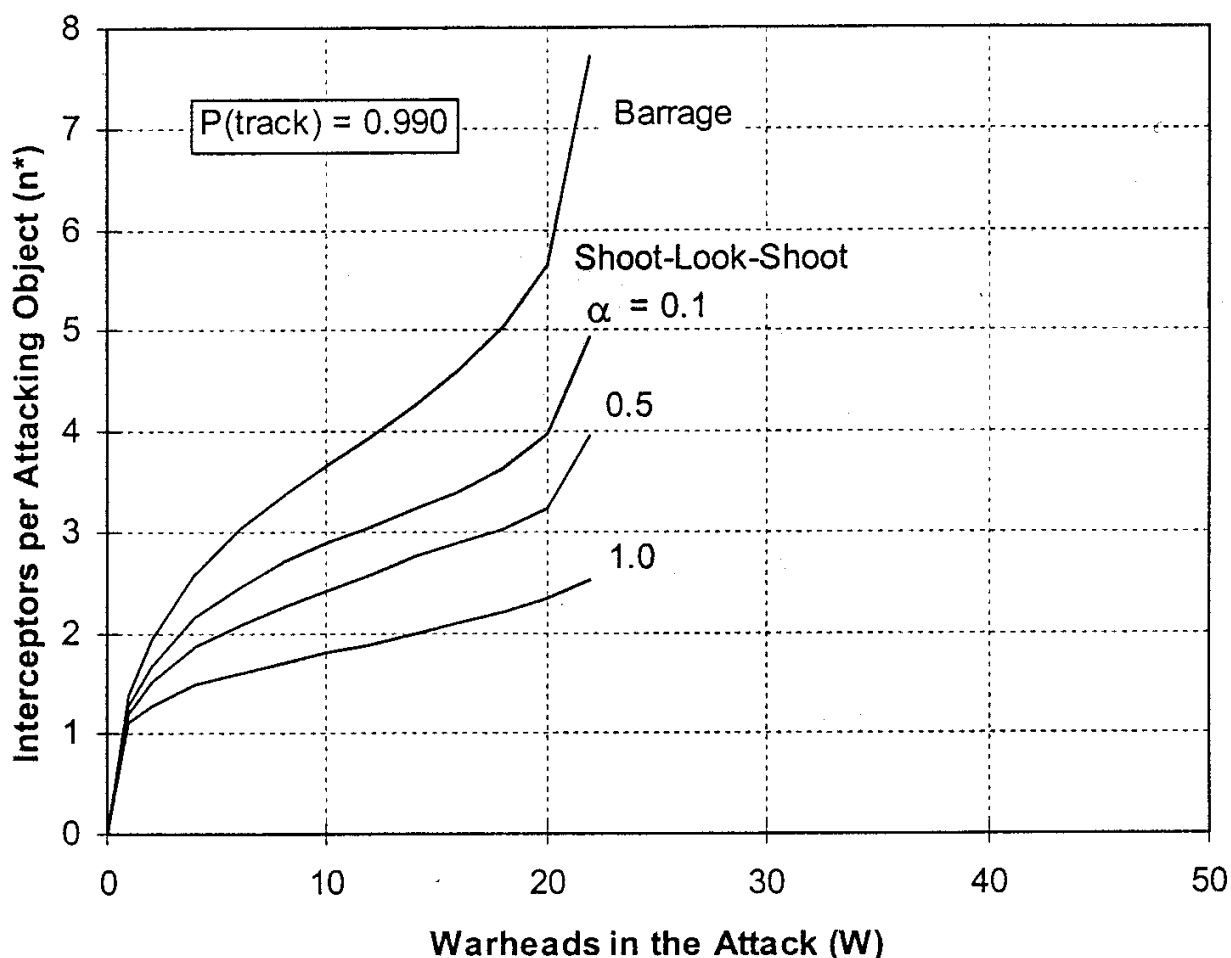


Рисунок 3. Число выделяемых перехватчиков в зависимости от масштаба нападения. $P(track) = 0.99$, SSPK = 0.7. По оси абсцисс отложено число атакующих боеголовок, по оси ординат - число перехватчиков на каждый атакующий объект. Верхняя кривая соответствует режиму заградительного огня, остальные – режиму стрельбы с корректировкой.

МНОГОСЛОЙНАЯ ОБОРОНА

Многослойная оборона с разными системами ПРО и независимыми датчиками обнаружения и слежения в каждом слое может, в принципе, достигнуть очень высокой эффективности. Если считать, что недостатками общего типа между разными слоями можно пре-

небредь (есть несколько возможностей проверить это в реальных военных условиях), эффективность обороны с m слоями выражается в следующем виде

$$K_w = 1 - L_1 L_2 \dots L_m \quad (12)$$

где L_i - вероятность того, что боеголовка проходит через i -ый слой обороны¹⁹. Например, если предположить, что вероятность поражения цели равна 0.97 в каждом из двух слоев, полная вероятность того, что объект может быть уничтожен, составит приблизительно 0.999; это подразумевает, что такая оборона может, в принципе, заблокировать 100 из 100 боеголовков с вероятностью 0.9 (см. рис.2).

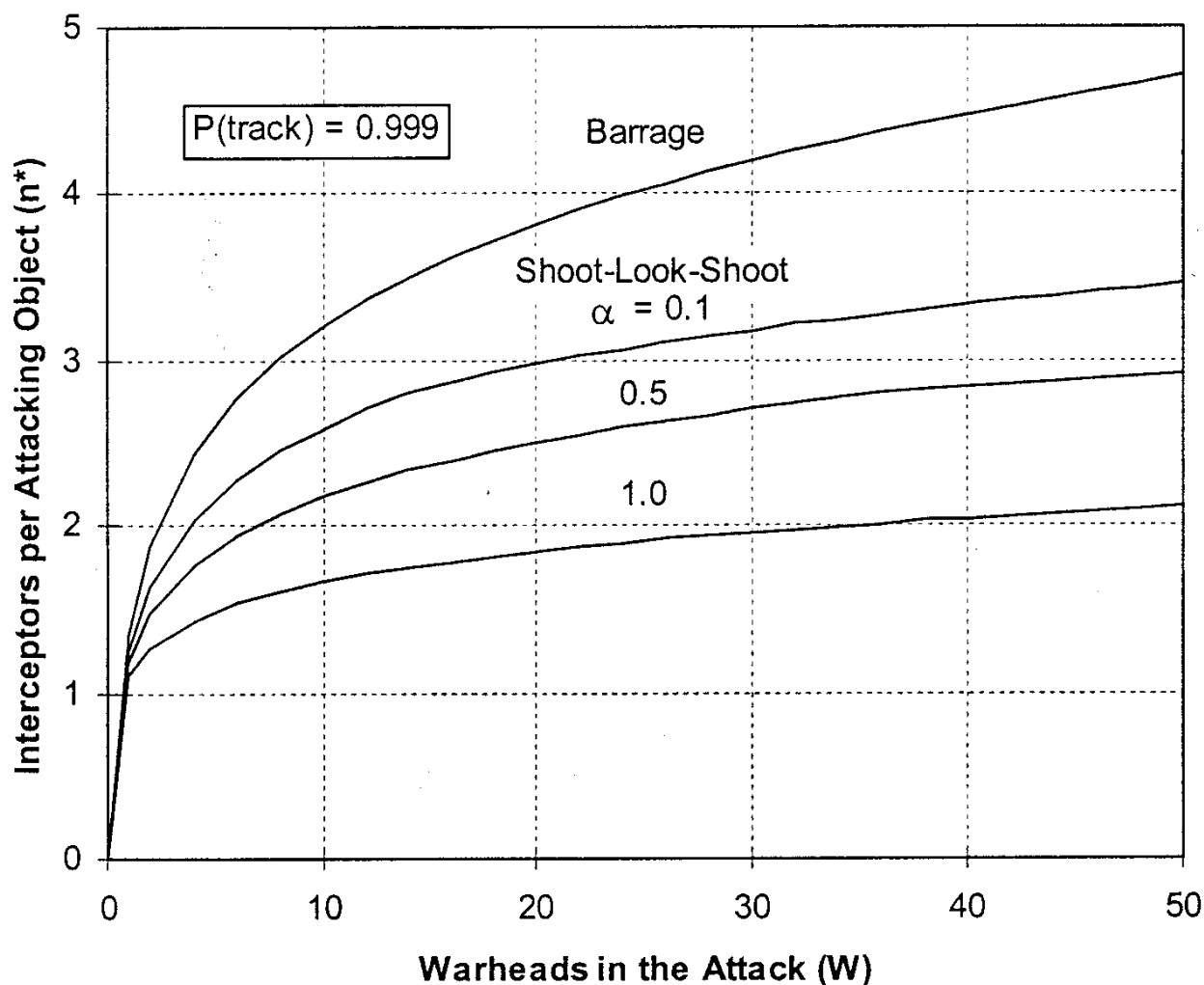


Рисунок 4. Число выделяемых перехватчиков в зависимости от масштаба нападения. $P(\text{track}) = 0.999$, $\text{SSPK} = 0.7$. Остальные обозначения такие же, как и на рис.3

ПРИМЕНЕНИЯ

Чтобы ответить на вопрос "Сколько ПРО окажется достаточной?", придется коснуться двух вопросов: сколько надо площадок ПРО для адекватного покрытия представляющей интерес территории и сколько перехватчиков надо разместить на каждой площадке для удовлетворения критерию выполнимости? Число требуемых площадок ПРО зависит от зоны прикрытия ПРО, которая является функцией начальной скорости перехватчика и времени, которое имеется для его вылета, а последнее определяется скоростью налетающей цели и дальностью обнаружения радаром. В свою очередь, дальность радара зависит от произведения мощность-апертура, радарного поперечного сечения и числа целей, которые он дол-

жен одновременно просматривать. Зоны прикрытия при стрельбе с корректировкой меньше, чем при заградительной стрельбе, так как для попытки сделать второй выстрел остается меньше времени. Кроме того, эта модель предполагает, что SSPK перехватчика не меняется в пределах защищаемой зоны и что сама зона не сужается заметно при рассматриваемых здесь масштабах нападения. Наконец, поскольку SSPK и $P(track)$ для будущих оборонительных систем являются весьма предположительными, применения обсуждаемой в этом разделе модели начнутся в предположении некоего номинального развертывания ПРО и последующих вопросов о том, как хорошо такая система может работать технически, чтобы обеспечить имеющую смысл оборону.

НАЦИОНАЛЬНАЯ ПРОТИВОРАКЕТНАЯ ОБОРОНА

Если Соединенные Штаты решат развернуть тонкую систему НПРО после июня 2000 г., система будет развернута в несколько этапов. Скорее всего, поначалу к 2005 г. будут развернуты 20 перехватчиков НПРО на одной площадке либо в центральной Аляске, либо на базе Грэнд Форкс в Северной Дакоте. Второй этап развертывания может включать до 100 перехватчиков НПРО на одной площадке к 2010 г., а на третьем потенциально могут быть развернуты по 125 перехватчиков НПРО на двух площадках к 2015 г. (всего 250) ²⁰. Все эти варианты развертывания НПРО в разной степени нарушают Договор ПРО ²¹. Остается увидеть, согласится ли Россия изменить Договор ПРО и позволить такие развертывания. Тем не менее, если предположить, что Договор ПРО будет либо изменен, либо аннулирован и США начнут развертывание НПРО, можно подсчитать тактико-технические характеристики, которые должна иметь такая система для обеспечения разумной защиты. При варианте развертывания на нескольких площадках следует иметь в виду, что нападающая сторона может сосредоточить свои атаки на целях, находящихся в одной защищаемой зоне для перенасыщения обороны.

Предположим в иллюстративных целях, что угрозу осуществляют 10 боеголовок без ложных целей (поначалу) и что критерий обороноспособности состоит в уничтожении всех десяти боеголовок с вероятностью 0.8. На рис.5 показано, как изменяется число перехватчиков НПРО, требуемое для удовлетворения этому критерию, в зависимости от значений $P(track)$ и SSPK перехватчика в режиме заградительного огня. Обратите внимание, что оборона не может удовлетворить критерию выполнимости при значениях $P(track)$ менее 0.978 независимо от значений SSPK перехватчика или от того, сколько выстрелов было произведено. В доктрине заградительного огня число выстрелов по каждой боеголовке постоянно вдоль каждого отдельного графика (где параметром служит полное число использованных перехватчиков). Например, на графике с цифрой 40 по каждой боеголовке производится 4 выстрела. В то время, как при большем числе выстрелов по налетающей цели уменьшается SSPK, требуемая на выстрел, существуют пределы на число перехватчиков, запускаемых одновременно, из-за необходимости избежать насыщения оборонительного боевого пространства. Четыре выстрела на цель – это разумный верхний предел ²². Поэтому требуемые тактико-технические характеристики для обороны с 20 и 100 перехватчиками соответствуют любым значениям SSPK и $P(track)$ справа от графиков с параметрами 20 и 40, соответственно, то есть, значениям SSPK перехватчика примерно выше 0.92 и 0.70, соответственно, и значению $P(track)$ выше 0.985.

В случае иного масштаба нападения придется рисовать новые графики. Если при этом применяются ложные цели, требуемые технические характеристики для обороны можно будет определить из графиков такого же типа, как и на рис.5, но при этом следует помнить, что надо умножить число перехватчиков НПРО, соответствующих каждому графику, на величину W^*/W , чтобы получить истинное число требуемых перехватчиков для выполнения критерия выполнимости обороны в присутствии ложных целей. Например, если к каждой боеголовке добавить по две ложные цели высокого качества (при масштабе нападения 10 боеголовок это будет соответствовать появлению 30 кажущихся боеголовок), обороне в 100 перехватчиков придется иметь высокие значения параметров $P(track)$ и SSPK в области справа от графика с 33 перехватчиками на рис.5, если обороне следует сбить все 10 реальных боеголовок с эффективностью 0.80 ²³.

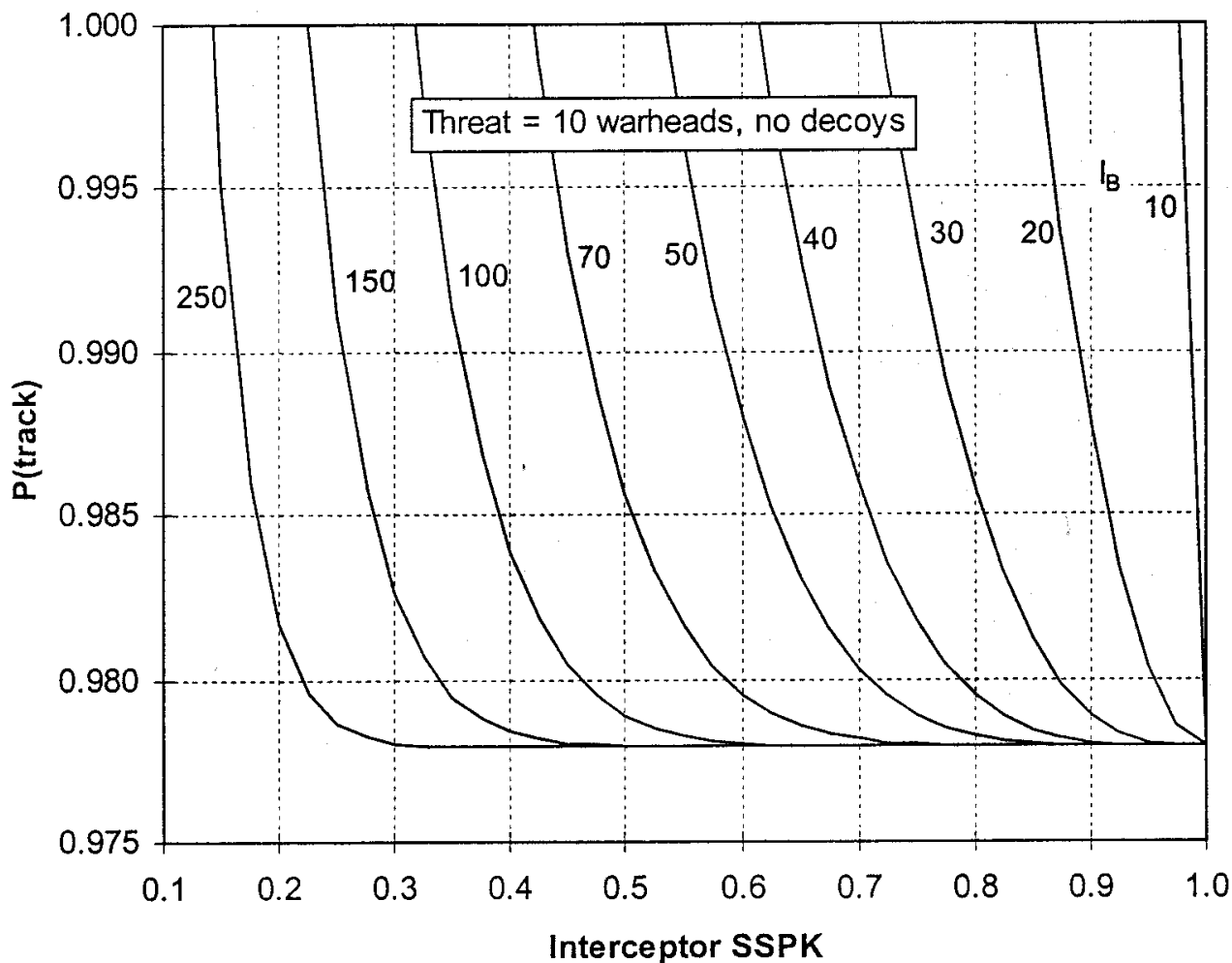


Рисунок 5. Взаимосвязь полного числа выпущенных перехватчиков НПРО (в режиме заградительного огня) с параметрами $P(\text{track})$ и SSPK. Масштаб нападения – 10 боеголовок без ложных целей.

На рис.6 приведены те же переменные для режима корректировки огня при масштабе нападения 10 боеголовок без ложных целей. На этом рисунке число выстрелов, предпринятых по каждой налетающей боеголовке, не является постоянным на соответствующих графиках. Более того, оптимальное число выстрелов, предпринятых в первой попытке, изменяется вдоль рисунка: один выстрел находится где-то между графиками, соответствующими 10 и 25 перехватчикам, два выстрела – между графиками для 25 и 40 перехватчиков и три выстрела – между графиками для 40 и 100 перехватчиков, а для четырех и более выстрелов надо уходить влево от графика для 100 перехватчиков. Если в нападении участвуют ложные цели, всю картину следует пересчитать с учетом некоторых предположений относительно SSPK для ложных целей. Если этот параметр остался таким же, как и для боеголовок, требуемые технические характеристики можно получить просто путем умножения соответствующих цифр для графиков на рис.6 на выражение W^*/W для получения реального числа боеголовок, которое требуется, чтобы удовлетворить критерию выполнимости обороны, как это было сделано в случае режима заградительного огня. Наконец, система НПРО с базированием на одной площадке не сможет покрыть континентальную территорию США с использованием режима корректировки огня. Обычно требуется от 4 до 9 площадок²⁴. Следовательно, полное число перехватчиков, развернутых по всей территории страны, в 4-9 раз превышает величины, приведенные на рис.6. Сравнивая это с уровнями перехватчиков в режиме корректировки огня (что приведено на рис.5), можно прийти к выводу, что режим

корректировки огня не кажется более эффективным для тонкой НПРО, особенно если рассмотреть технические трудности, обеспечивающие разумную оценку вероятности поражения до того, как предпринят второй залп.

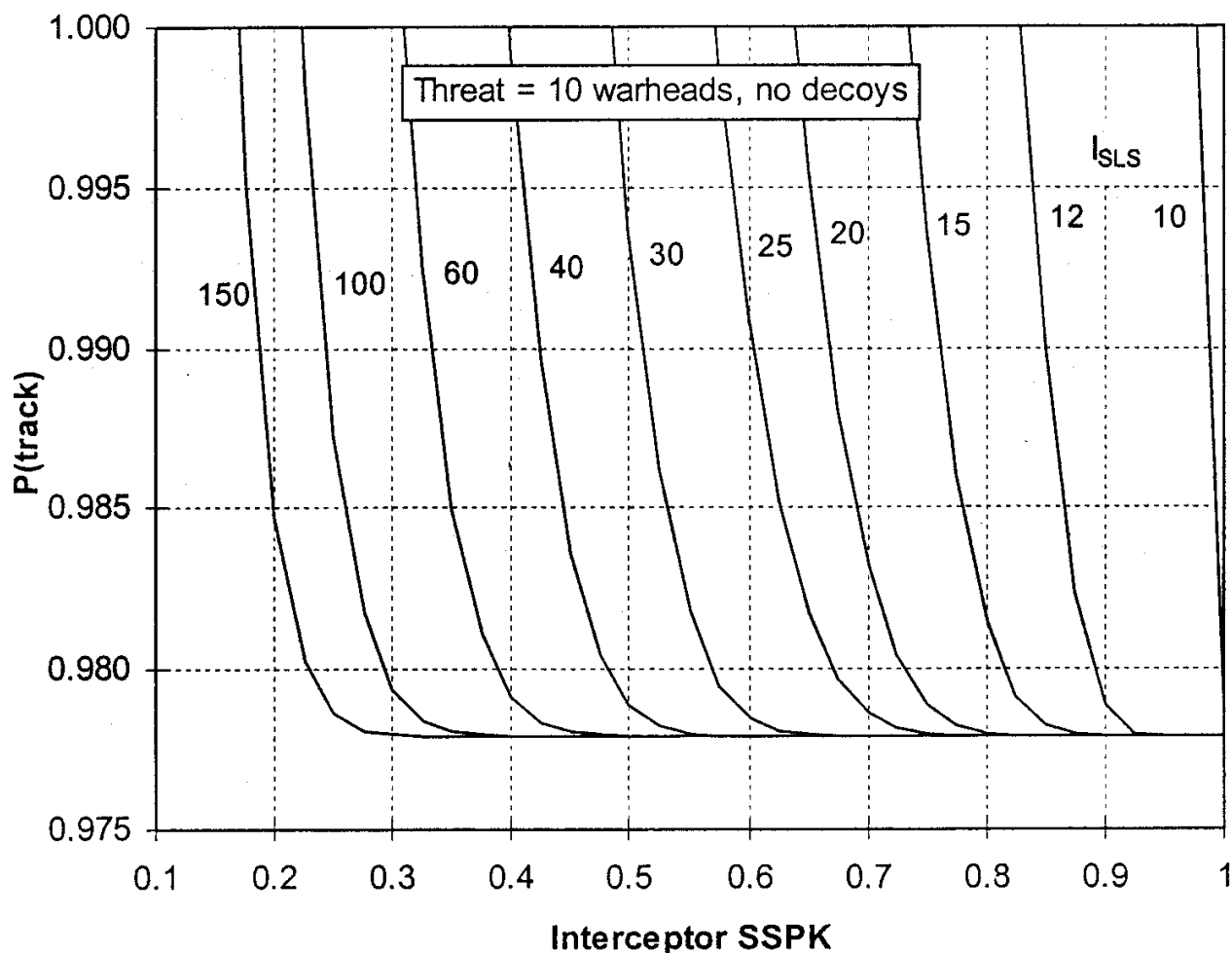


Рисунок 6. Взаимосвязь полного числа выпущенных перехватчиков НПРО (в режиме корректирования огня) с параметрами $P(track)$ и SSPK. Масштаб нападения – 10 боеголовок без ложных целей.

ПРОТИВОРАКЕТНАЯ ОБОРОНА НА ТЕАТРЕ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ

Системы ПРО на ТВД имеют меньшие защищаемые зоны из-за более коротких времен полета баллистических ракет на ТВД и более медленных скоростей перехватчиков ПРО. Поэтому обычно надо иметь несколько площадок развертывания, чтобы достигнуть адекватного покрытия. Например, в недавней оценке министерства обороны США заявляется, что потребуется четыре батареи ракет ТХААД для покрытия Южной Кореи и шесть для покрытия Японии (или только четыре, если в архитектуре системы предусмотреть три дополнительных радаров ТХААД) при работе в режиме заградительного огня²⁵. Северные районы Южной Кореи (включая Сеул) требуют оборону нижнего эшелона, поскольку минимальная высота перехвата 40 км, предусмотренная для ТХААД, мешает использованию перехватчиков против ракет малой дальности Северной Кореи, которые могут угрожать этому региону. Сходное число батарей ТХААД (около 10) потребуется для покрытия важных территорий в районе Персидского залива. Получаемое при применении НТВ для высокой эшелонной защиты покрытие зависит от расположения судов с НТВ относительно мест пуска баллистических ракет, обеспечения датчиками и полетной скорости перехватчиков НТВ. Наиболее выгодный сценарий – покрытие территории Японии, поскольку суда с НТВ могут

находиться между источником угрозы (Северная Корея) и территорией, находящейся под защитой. На самом деле, корабли с НТВ, расположенные в центре Японского моря, могли бы сбивать ракеты Северной Кореи на участке подъема траектории и тем самым обеспечивать очень большие обороняемые зоны за кораблями. Один корабль с НТВ должен иметь возможность защитить всю Японию при полетной скорости перехватчика 4-4.5 км/с²⁶. Оборона Южной Кореи потребует еще одного корабля с НТВ, хотя перехватчики НТВ не могут покрыть две трети северной территории Южной Кореи, поскольку они не смогут сбить ракеты малой дальности (типа Скард-Б) по той причине, что те летят ниже минимальной высоты перехвата НТВ (приблизительно 70 км). Покрытие перехватчиками НТВ в районе Персидского залива будет более трудным из-за нехватки доступных морских участков.

Число перехватчиков ТХААД или НТВ верхнего эшелона, требуемое для каждой площадки, может быть рассчитано только после конкретизации архитектуры системы. В иллюстративных целях рассмотрим систему обороны с двумя слоями, где в качестве верхнего эшелона задействованы ТХААД или НТВ, а в качестве нижнего – ПАК-3, причем считается, что эффективность обоих слоев одинакова, то есть предполагаются те же самые значения SSPK перехватчика и $P(track)$ (то есть, предполагается одинаковая доля проникновения через каждый слой). Хотя в общем случае это не так, подобное предположение позволяет нам увидеть, как изменяется требуемое число перехватчиков верхнего эшелона в зависимости от полных технических характеристик обороны. Кроме того считается, что оба слоя работают только в режиме заградительного огня (чтобы получить покрытие большой площади верхним эшелонам и потому, что для нижнего эшелона время очень мало для работы в любом ином режиме за исключением заградительного огня). Поэтому такая слоистая архитектура обеспечивает тонкую оборону всей площади театра военных действий, где отобранные высокоценные цели защищаются как верхним, так и нижним оборонительными эшелонами.

На рис.7 показано требуемое число перехватчиков верхнего эшелона ТХААД, работающих в режиме заградительного огня, для уверенности в том, что ни одна боеголовка не пройдет через верхний и нижний эшелоны с вероятностью 0.5 при масштабе нападения 100 боеголовок, в зависимости от параметров SSPK и $P(track)$, которые предполагаются равными для верхнего и нижнего эшелонов. Число перехватчиков ПАК-3, необходимое для нижнего эшелона, не подсчитано. В общем случае, оно будет значительно меньше числа перехватчиков в верхнем эшелоне. Если при нападении применяются ложные цели, число перехватчиков надо умножить на коэффициент W^*/W , полагая одни и те же значения SSPK для перехватчиков и ложных целей в обоих эшелонах. Если снова предположить, что на каждую налетающую цель не может быть направлено более четырех перехватчиков (чтобы не допустить насыщения боевого пространства), тогда технические характеристики верхнего и нижнего эшелона должны лежать справа от графика, соответствующего цифре в 400 перехватчиков, на рис.7, то есть значения SSPK для перехватчиков ТХААД (или НТВ) и ПАК-3 должны быть примерно выше 0.60, а вероятность обнаружения и отслеживания должна превышать 0.94, чтобы оборона оказалась эффективной. Планировщики ПРО на ТВД явно надеются иметь SSPK для ТХАА в диапазоне 0.80-0.85²⁷. Наконец, критичное допущение по отношению к ситуации на рис.7 состоит в отсутствии ошибок общего типа между нижним и верхним слоями. Если такие ошибки общего типа все же существуют, они должны быть менее примерно 0.1% , чтобы рис.7 оставался верным.

Предположение о том, что все перехватчики могут стрелять по налетающим целям, эквивалентно допущению, что противник распределяет свое нападение равномерно по всем обороняемым районам. Однако против обороны, размещенной на многих площадках, противник скорее всего сконцентрирует свою атаку, чтобы насытить небольшое число площадок с учетом следующих ограничений: не все находящиеся в наличии баллистические ракеты смогут достигнуть обороняемых участков из-за ограничений на расстояние и не все ракеты могут быть запущены в один день из-за нехватки пусковых установок. В то время как подвижные ракеты типа "Скард" могут быть перезаряжены за несколько часов, мало пусковых установок смогут запустить более одной ракеты в день из-за необходимости перейти на новое место и замаскироваться, чтобы избежать нападений ВВС США²⁸. Значит, на каждой оборонительной площадке надо иметь достаточно перехватчиков, чтобы справиться с максимальным количеством ракет, которое может быть запущено в одном залпе (равное числу подвижных пусковых установок), в предположении, что с последующими атаками можно будет справиться пополнением перехватчиков на тех площадках, где их количество истощено,

путем доставки со складов на ТВД за время менее суток. Как показывает опыт, страны размещали примерно 4-15 ракет на подвижной пусковой установке из расчета, что в крайнем случае за один день можно будет запустить 6-25% всего арсенала²⁹. Например, Россия размещала четыре ракеты на каждой подвижной пусковой установке “Скад-Б”, а Ирак имел примерно 15 ракет “Эль Хуссейн” на подвижную пусковую установку до войны в Персидском заливе 1991 г. и действительно запускал максимально до 6% своего арсенала в течение одного дня³⁰.

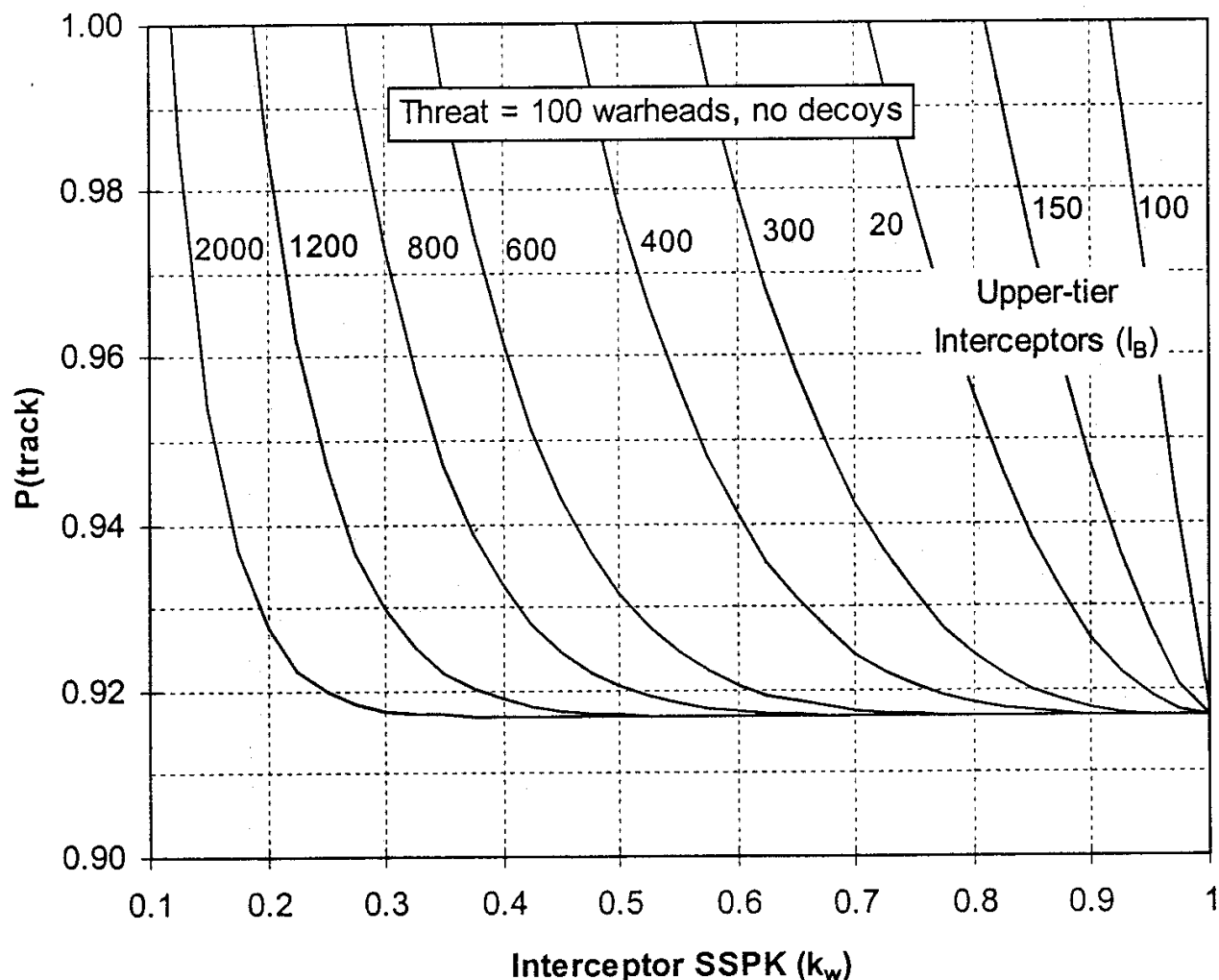


Рисунок 7. Взаимосвязь полного числа выпущенных перехватчиков верхнего эшелона ТХААД (в режиме заградительного огня) с параметрами $P(track)$ и SSPK. Масштаб нападения – 100 боеголовок без ложных целей.

Поэтому, если требуются четыре площадки для покрытия Японии от ракет “Нодонг” и “Теподонг” и Северная Корея может запустить максимум 10% своего арсенала за один день, полное число перехватчиков, которые должны быть развернуты на ТВД для гарантии того, что ни одна площадка не будет насыщена при залповом нападении, в 1.3 раза выше числа перехватчиков, приведенного на рис.7³¹. Следовательно, если у Северной Кореи есть 100 ракет “Скад Б/С” и 100 ракет “Нодонг”/“Теподонг”, потребуются развернуть 520 ракет ТХААД на четырех площадках в Южной Корее и 520 ракет ТХААД на четырех площадках в Японии для гарантии того, что ни одна боеголовка с вероятностью 0.5 не пройдет через верхний и нижний эшелоны и не попадет ни на одну из этих стран (в предположении, что технические характеристики обоих эшелонов находятся справа от графика “400” на рис.7 для ракет “Скад Б/С” и “Нодонг”/“Теподонг”, то есть SSPK перехватчиков будут выше примерно 0.6 а вероятность отслеживания – выше примерно 0.94, и на каждую цель выпускается четыре перехватчика). Система НТВ также должна иметь технические характеристики, соответствующие

области справа от графика “400” на рис.7 при нападении 100 ракет “Нодонг”/”Теподонг” на Японию. Впрочем, противник не сможет сконцентрировать свое нападение для насыщения обороны, поскольку одна площадка НТВ покрывает всю Японию. Поэтому только 400 (а не 520) перехватчиков НТВ надо будет развернуть для защиты Японии от максимального залпового пуска. Наконец, если при нападении применяются ложные цели, которая оборона не сможет дискриминировать, число перехватчиков, требуемое для удовлетворения критерию выполнимости обороны, можно получить путем умножения цифры на любом из графиков рис.7 на коэффициент W^*/W и это даст нужное число перехватчиков при наличии ложных целей.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этой статье моделируются системы ПРО, основанные на перехватчиках, в виде проблемы испытаний Бернулли, где технические характеристики обороны скрыты в нескольких параметрах: SSPK перехватчика, вероятность обнаружения, отслеживания и классификации $P(track)$ и отношение числа кажущихся боеголовок к реально участвующим в нападении боеголовкам (то есть, W^*/W). Эту модель можно применить для подсчета “Сколько ПРО окажется достаточным?”, если только приводятся достоверные значения указанных параметров. Однако, поскольку тактико-технические характеристики будущих систем ПРО весьма предположительны, эта модель была использована для понимания тех технических характеристик, которым должны удовлетворять текущие программы ПРО, если они нацелены на полезные оборонительные задачи. Например, система НПРО со 100 перехватчиками, базирующимися на одной площадке и работающими в режиме заградительного огня (когда по-зволяется использовать не более четырех перехватчиков на любую налетающую цель), должна добиться значений $P(track)$ свыше 0.985 и SSPK перехватчика выше 0.7, если она предназначена заблокировать нападение до 10 боеголовок, сопровождаемых в среднем 2.5 неразличимыми ложными целями на боеголовку. Кроме того, эта модель демонстрирует, что доктрины стрельбы с корректировкой огня, вероятно, не являются рентабельными для тонкой НПРО, так как они требуют примерно такого же числа перехватчиков, как и в доктрине заградительного огня, для получения одинаковой эффективности (поскольку им надо больше площадок для адекватного покрытия и они требуют оценки эффективного поражения после первого выстрела).

ПРО на ТВД встретится с более крупными угрозами. Значит, мы должны иметь несколько эшелонов обороны, у каждого из которых будут свои датчики и перехватчики, особенно для защиты очень ценных целей, например, городов союзников. Если системы ПРО верхнего и нижнего эшелонов предназначены для защиты городов союзников от арсенала баллистических ракет, содержащих до сотни одиночных боеголовок с ядерными, биологическими или химическими полезными нагрузками, перехватчики верхнего и нижнего эшелонов должны иметь значения SSPK выше примерно 0.6 и вероятность обнаружения и отслеживания – примерно выше 0.94, причем недостатки общего типа для верхнего и нижнего эшелона предполагаются пренебрежимо малыми. Если нападение сосредоточено на насыщении одной площадки верхнего эшелона при многослойной архитектуре, потребуется примерно на 25-75% больше перехватчиков в зависимости от числа площадок верхнего эшелона, которые необходимы для полного покрытия и для противостояния максимальной угрозе залпового старта. Если бомбы с БХО являются частью угрозы, потребуются системы ПРО с перехватом на активном участке. Наконец, если нельзя отличить усовершенствованные ложные цели от боеголовок либо в случае НПРО, либо для ПРО на ТВД, то необходимая для выполнения критерия разумной готовности оборона будет нарастать линейно с кажущимся масштабом нападения в случае доктрин заградительного огня.

ПРИЛОЖЕНИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРЕХВАТЧИКУ

Из уравнений (5) и (11) можно вывести число выстрелов, которое надо произвести по каждой налетающей боеголовке, чтобы добиться заданного уровня эффективности обороны $P(0)$ при участии в нападении W боеголовок. Технические характеристики обороны включены в параметры k_w и $P_w(track)$. В результате получаем

$$n = \frac{\ln\left(1 - \frac{P(0)^{1/W}}{P_w(track)}\right)}{\ln(1 - k_w)} \quad (13)$$

Это уравнение верно независимо от наличия ложных целей. Вообще говоря, это уравнение дает нецелые значения числа перехватчиков n , выделяемых на каждую налетающую цель. Целое значение n , удовлетворяющее критерию эффективности обороны, дается простым соотношением

$$n^* = \text{Int}(n) + 1 \quad (14)$$

где $\text{Int}(n)$ – целая часть числа n .

Впрочем, нецелым значениям числа n можно дать разумную интерпретацию, а именно, на некоторую часть налетающих целей направляется $\text{Int}(n)$ перехватчиков, а на оставшуюся часть – $(\text{Int}(n) + 1)$ перехватчиков. Эта интерпретация приближительна, как можно убедиться, если пересчитать уравнение (5) со смесью числа выделяемых на цель перехватчиков. Корректное уравнение для таких условий будет иметь вид

$$P(0) = K_{wi}^{(1-f)W} K_{wi+1}^{fW} \quad (15)$$

где K_{wi} – вероятность поражения боеголовки, когда на каждую из $(1 - f)W$ целей направляются i перехватчиков, где f – нецелая часть n , а K_{wi+1} – вероятность поражения боеголовки, когда на оставшиеся цели направляются по $(i + 1)$ перехватчиков. Это можно свести к следующему виду

$$P(0) = P(track)^W [(1 - i^i)^{1-f} (1 - i^{i+1})^f]^W \quad (16)$$

откуда можно вывести усредненную вероятность поражения боеголовки $\langle K_w \rangle$, связанную с разделением числа перехватчиков, направляемых на каждую цель

$$\langle K_w \rangle = P_w(track) (1 - i_w^i)^{1-f} (1 - i_w^{i+1})^f \quad (17)$$

Уравнение (11) служит разумным приближением к уравнению (17) для значений n , превышающих единицу.

Доктрина заградительного огня

Число перехватчиков ПРО, требуемое для выполнения критерия технического уровня обороны, зависит от кажущегося масштаба нападения, то есть параметра W^* в уравнении (1), и доктрины стрельбы, подразумеваемой для обороны. Простейшая доктрина – это заградительный огонь³², когда n перехватчиков направляются почти одновременно на каждую налетающую цель. Число перехватчиков I_B , требуемое для заградительного огня, просто равно

$$I_B = W^* n = W^* \left(\frac{\ln\left(1 - \frac{P(0)^{1/W}}{P_w(track)}\right)}{\ln(1 - k_w)} \right) \quad (18)$$

Как и раньше, $P(0)$ – это желаемая вероятность того, что ни одна боеголовка не проникнет через оборону, W^* – кажущееся число нападающих боеголовок, W – число реальных боеголовок, участвующих в атаке, $P_w(track)$ – вероятность обнаружения, отслеживания и дискри-

минации, а k_w - SSPK перехватчика против боеголовок. При заградительном огне число требуемых перехватчиков растет линейно с кажущимся масштабом нападения (если только число реальных боеголовок остается фиксированным).

Уравнение (18) предполагает, что все перехватчики могут стрелять по налетающим целям. Это справедливо для одиночной площадки ПРО, обладающей достаточной обороняемой зоной, чтобы покрыть всю представляющую интерес территорию. Это справедливо также, если для покрытия всей территории нужно иметь несколько площадок ПРО и если нападение равномерно распределено по всем обороняемым зонам. Однако, если атака сосредоточена на целях в пределах одной зоны, охраняемой ПРО (при оборонительной системе, включающей несколько площадок), в попытке насытить оборону, тогда для обороны каждой зоны система ПРО должна иметь I_B перехватчиков. Поэтому для защиты от концентрированной атаки против одной площадки (в системе со многими площадками) всего надо развернуть mI_B перехватчиков, где m - число площадок ПРО, требуемое для полного покрытия³³.

Доктрина оптимальной стрельбы с корректировкой огня

Если возможна тактика корректировки огня, потребуется меньшее число перехватчиков для эквивалентной эффективности обороны, поскольку второй выстрел(ы) направляется только на те боеголовки и ложные цели, которые не были уничтожены при первом выстреле. Но режим корректировки технически более требователен, так как для него требуется точная оценка поражения после первого выстрела и обычно надо иметь перехватчики с высокой скоростью, чтобы обеспечить разумную защиту охраняемых зон, поскольку на вторую попытку перехвата остается меньше времени.

Для упрощения расчетов используется ожидаемое значение числа кажущихся боеголовок, проходящих незатронутыми после первого выстрела. В более точных расчетах будут использоваться вероятностные распределения числа боеголовок и ложных целей, которые классифицированы как боеголовки, выживших после первого выстрела. Используя подход ожидаемого значения, получим требуемое число перехватчиков при тактике корректировки огня I_{sls}

$$I_{sls}(s) = sW^* + [(1-k_w)^s P_{ww}W + (1-k_d)^s P_{dw}D](n-s) \quad (19)$$

где s - целое число, представляющее собой число перехватчиков, направленных на каждую кажущуюся боеголовку при первом выстреле, n - число перехватчиков, которых надо направить на каждую боеголовку, чтобы удовлетворить критерию выполнимости обороны [оно дается уравнением (12)], а другие переменные определены ранее. Это можно переписать в виде числа перехватчиков, приходящихся на каждую кажущуюся боеголовку, в следующем виде

$$\frac{I_{sls}}{W^*} = n^* = s + [\alpha(1-k_w)^s + (1-\alpha)(1-k_d)^s](n-s) \quad (20)$$

где

$$\alpha = \frac{P_{ww}W}{(P_{ww}W + P_{dw}D)}$$

- та часть кажущихся атакующих объектов, которая представляет боеголовки, а $(1-\alpha)$ - это доля атакующих объектов, относящаяся к ложным целям. Часто $s=1$, хотя сведение I_{sls} к минимуму может потребовать, чтобы s было больше единицы.

Оптимальное число перехватчиков при первом выстреле (которое сводит к минимуму величину I_{sls}) можно найти, если использовать следующее определение минимального значения

$$n^*(s_0 + 1) \geq n^*(s_0) \leq n^*(s_0 - 1) \quad (21)$$

Эти неравенства после ряда алгебраических операций можно свести к виду

$$F(n, s_0) \leq 1 \leq F(n, s_0 - 1) \quad (22)$$

где

$$F(n, s) = [\alpha k_w (1 - k_w)^s + (1 - \alpha)(1 - k_d)^s](n - s) + [\alpha(1 - k_w)^{s+1} + (1 - \alpha)(1 - k_d)^{s+1}] \quad (23)$$

При заданном значении n величину s_0 можно найти неявным образом из уравнения

$$F(n, s_0 - 1) = 1 \quad (24)$$

Целая часть оптимального числа перехватчиков равна просто $\text{Int}(s_0)$. Если SSPK перехватчика одна и та же как против ложных целей, так и против боеголовок (то есть, $k_w = k_d$) или если ложные цели не участвуют в нападении (то есть, $\alpha = 1$), приведенное выше уравнение сводится к следующему

$$[k_w(n - s_0) + 1](1 - k_w)^{s_0 - 1} = 1 \quad (25)$$

Обратите внимание, что в этом случае оптимальное число выделенных на цель перехватчиков не зависит от кажущегося масштаба нападения W^* . Значит, число I_{sls} требуемых для обороны с оптимальным корректированием огня перехватчиков пропорционально кажущемуся масштабу нападения при фиксированном количестве истинных боеголовок, участвующих в атаке, если предполагать, что $k_w = k_d$ по мере того, как растет размер атаки, что отмечалось и для доктрины заградительного огня.

С другой стороны, если взять целое значение s , можно определить, когда число выстрелов по каждой кажущейся боеголовке становится достаточно большим, так что оптимальное число перехватчиков при первом выстреле изменяется от s до $s+1$ (мы отбрасываем индекс, обозначающий оптимальное значение s , чтобы упростить формулы)³⁴. Так определяется ряд “переходных” чисел n_s при условии, что оптимальное число перехватчиков в первом выстреле равно s и соблюдается неравенство

$$n_s \leq n < n_{s+1} \quad (26)$$

где n_s является решением уравнения

$$F(n_s, s - 1) = 1 \quad (27)$$

для целых значений s . Этот подход удобен тем, что уравнение (23) можно решить в явном виде и получить значение n_s

$$n_s = (s - 1) + \frac{1 - [\alpha(1 - k_w)^s + (1 - \alpha)(1 - k_d)^s]}{[\alpha k_w (1 - k_w)^{s-1} + (1 - \alpha)k_d (1 - k_d)^{s-1}]} \quad (28)$$

И опять, если SSPK перехватчика для боеголовки и ложной цели равны или если нет ложных целей при нападении, это уравнение сводится к следующему виду

$$n_s = s - \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k_w(1 - k_w)^{s-1}} \quad (29)$$

В табл.1 приведены четыре первых значения n_s для разных величин SSPK перехватчика в предположении, что SSPK одна и та же для ложных целей и боеголовок. Практические оборонительные системы будут иметь не более пяти перехватчиков, выделяемых на каждую

налетающую цель. Значит, при оптимальном распределении перехватчиков в режиме с корректировкой огня редко потребуются более двух перехватчиков при первом выстреле. Нецелые значения n_s интерпретируются так же, как и раньше, то есть они дают переходные числа, которые минимизируют уравнение (19) при условии, что в первом выстреле берется s перехватчиков, а второй выстрел разделяется, причем на некоторые цели направляется $\text{Int}(n-s)$ перехватчиков, а на остальные $\text{Int}(n-s+1)$ перехватчиков. Если SSPK перехватчика для боеголовок и ложных целей различны, что может оказаться реальным, надо решать уравнение (28) для определения переходных чисел.

Таблица 1. Переходные числа в зависимости от SSPK перехватчика

SSPK перехватчика									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
n_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n_2	3.11	3.25	3.43	3.67	4	4.5	5.33	7	12
n_3	5.35	5.81	6.47	7.44	9	11.75	17.44	33	113
n_4	7.72	8.77	10.38	13.07	18	28.38	55.48	159	1114

БЛАГОДАРНОСТИ

Я хотел бы поблагодарить Стива Феттера, Джеффри Фордена, генерал-лейтенанта ВВС в отставке Джулиана Пэлмора и Кэвина Су Ху за обсуждение различных аспектов этой работы. Кроме того я особо благодарю Дэвида Вогана, предложившего ряд подходов, использованных в статье. Еще я хочу вынести благодарность Центру по международной безопасности и сотрудничеству при Стэнфордском университете и корпорации Карнеги, без чьих поддержек эта работа оказалась бы невозможной. Все высказанные в статье точки зрения принадлежат целиком автору.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. The Ballistic Missile Defense Organization, *Report to the Congress on Ballistic Missile Defense*, (Washington, D.C.: GPO, 1995): 3-3.
2. M.Dornheim, "Missile Defense Design Juggles Complex Factors," *Aviation Week and Space Technology* (February 1997):54.
3. Военные силы, возможно, смогут продолжать функционировать, если рядом с ними упадут несколько баллистических ракет с оружием массового уничтожения. Биологическое и химическое оружие, в частности, будет неэффективно в значительной степени, если войска используют защитные приспособления. Впрочем, даже одна боеголовка с любым типом оружия массового уничтожения, попавшая на город союзника, окажется угрозой, превышающей то, что могло бы принять большинство союзных лидеров.
4. Сообщается, что ряд стран (например, Иран, Сирия, Северная Корея, Ливия) имеют от 100 до 200 ракет малой дальности типа "Скад" в своих нынешних арсеналах; впрочем, похоже, что число баллистических ракет средней дальности скорее всего будет меньше в течение ближайших 10-20 лет. Оценки в 50-200 баллистических ракет средней дальности кажутся разумными. Ирак имел примерно 220 ракет типа "Эль Хуссейн" и 11 ракет "Скад Б" перед началом войны в Персидском заливе 1991 г., причем 88 из них были запущены во время войны, хотя можно было произвести всего около 400 ракет "Эль Хуссейн" с момента начала программы. T.V. McCarthy and J.B. Tucker, "Saddam's Toxic Arsenal: Chemical and Biological weapons and Missiles in the Gulf Wars," In *Planning the Unthinkable: New powers and the Use of Nuclear, Biological, and Chemical Weapons*, edited by Peter Lavoy, Scott D.Sagan, and James Wirtz. (Cornell University Press, 2000); and *Jane's Strategic Weapons Systems*. (September, 1995):19.
5. Обзор аналогичных моделей распределения оружия по целям, в некоторые из которых входит число единиц оружия, проникших сквозь оборону, смотрите работу S.Matlin, "A Review of the Literature on The Missile-Allocation Problem," *Operations Research* (1970): 18:334-373. В частности, оптимальные модели распределения оружия по целям, дающие

- ожидаемые числа боеголовок, проходящих через оборону (без наличия ложных целей при нападении), даются в работах J.S.Przemieniecki, *Mathematica Methods in Defense Analysis*, 2nd Edition. (Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984), 154-159.: and N.K.Jaiswal, *Military Operations Research: Quantitative Decision Making*, (Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997), 169-172.
6. B.Gertz, "N.Korean missile seen posing risk to U.S.," *The Washington Times*, September 16, 1998:1.
 7. D.H.Rumsfeld, et al. *Executive Summary of the Report of the Commission To Assess The ballistic Missile Threat To The United States*, Pursuant to Public Law 201, 104th Congress (July 15, 1998). (<http://www/fas/org/irp/threat/bmthreat.htm>).
 8. Надежность пусковой установки также станет ошибкой общего типа, если одна установка запускает все перехватчики, направляемые на налетающие цели. С другой стороны, надежность пуска отдельного перехватчика включена в вероятность поражения Р (kill) без недостатков общего типа). Промежуточные случаи, когда в обороне участвуют несколько пусковых установок, но часть перехватчиков в простой стрельбе запускается одной установкой, более сложны и не рассмотрены здесь.
 9. Если предыдущим выстрелом цель разбивается на несколько обломков, но боеголовке фактически не наносится повреждение, как это было при перехвате ракеты "Скад", когда пустой топливный бак развалился на две части, а боеголовка сохранила боеспособность, то эти уравнения следует изменить для учета дополнительных фрагментов цели (предполагая, что образовавшиеся фрагменты нельзя отличить от боеголовки после неудавшегося перехвата). Такая дополнительная сложность отброшена данной моделью
 10. Разработчики НПРО явно надеются иметь SSPK около 0.85 (смотрите ссылку [2]). Для ПРО на ТВД надежды на SSPK для ТХААД близки к 0.80: Teal Group Corporation, TNAAD. *World Missile Briefing*. (Fairfax: VA, 1995, 6. Хотя эти цифры кажутся оптимистичными, они могут оказаться не совсем неразумными для единичных боеголовок, хотя можно ожидать, что значение SSPK упадет в присутствии мер противодействия противника.
 11. Например, гипотетический отслеживающий радар X-диапазона (длина волны 3 см) с мощностью 10 кВт, эффективной площадью антенны 10 м² (это дает большое значение для произведения мощность-апертура, хотя оно меньше порога в три миллиона ватт.м², заданного в Договоре ПРО для большого радара с фазированной решеткой) и частотой повторения 600 Гц сможет обеспечить вероятность обнаружения 0.999 для цели со средним радарным поперечным сечением 0.3 м² на расстоянии 500 км и с сигналом ошибочной тревоги не чаще раза в день. Это предполагает, что цель можно моделировать в виде кружащегося объекта типа 3 и что радар интегрирует 12 импульсов (то есть, интегрирует в течение 0.02 с) с уровнем шума в приемнике 2 дБ и обладает полными системными потерями менее 2 дБ. Такой радар окажется способным установить слежение с вероятностью свыше 0.99 для целей с радарным поперечным сечением 0.3 м² на расстоянии до 500 км. M.Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd Edition (McGraw-Hill, 1980), 15-65.
 12. Внеатмосферные перехваты происходят на высоте примерно выше 100 км. Перехваты внутри атмосферы происходят на высотах примерно ниже 80 км. Это различие важно принципиально, поскольку простые легкие ложные цели (баллоны, мусор и т.п.) удаляются из "облака угроз" на высотах между 80 и 100 км, что уменьшает проблему дискриминации ложных целей для систем ПРО наземного базирования, которые производят перехваты в пределах атмосферы. Следует отметить, что простые легкие ложные цели неэффективны на ракетах с дальностью менее 350 км, так как эти ракеты никогда не выходят за пределы атмосферы. Для ракет малой дальности противнику придется конструировать более сложные и более тяжелые ложные цели или другие средства проникновения.
 13. Боеголовки ПРО с взрывным разделением на осколки смогут лучше противодействовать отдельным касетным бомбам, но у существующих американских систем обороны верхнего эшелона (ТХААД и НТВ) имеются только боеголовки ударного поражения.
 14. Вскоре после завершения войны в Персидском заливе появились первые утверждения, что эффективность перехватчиков ПАК-2 составила 96% против иракских ракет "Скад". Но эта оценка была снижена после критических замечаний. Сегодня армия США утверждает, что ракетами ПАК-2 были успешно перехвачены 40% направленных на Израиль

"Скадов", где понятие "успешный перехват" определено как событие, когда при перехвате либо уничтожается или повреждается боеголовка, либо она сбивается с курса и не может поразить намеренную цель (подразумевается полезная нагрузка из ВВ); что касается нападений "Скадов" на Саудовскую Аравию, там было успешно перехвачено 70% ракет. Впрочем, армия утверждает также, что только в 25% перехватов боеголовка было уничтожена "с высокой степенью уверенности". С другой стороны, Центральное контрольно-финансовое управления, изучая эти утверждения, пришло к заключению, что имеющиеся в распоряжении факты подтверждают только 9% перехватов и существует вероятность, что менее 9% боеголовок "Скад" были действительно уничтожены. Смотрите работы J.Conyers, Jr., " The Patriot Myth: Caveat Emptor", *Arms Control Today* (November 1992):9; D.Bond, "Army Scales Back Assessments Of Patriot Success in Gulf War", *Aviation Week and Space Technology* (April 1992): 64; Дж.Льюис и Т.Постол, "Определение эффективности зенитных ракет 'Патриот' во время войны в Персидском заливе 1991 года по данным телевизионных видеосюжетов", *Наука и всеобщая безопасность*, 4 (1994): 1-32; Дж.Салливан и др., "Технические обсуждения эффективности 'Патриотов' в войне в Персидском заливе", *Наука и всеобщая безопасность*, 8:1 (1999):15-33.

15. Комиссия Рамсфелда недавно указала на слабости американской разведывательной общественности в вопросе о возможности аккуратно проследить за разработкой программ баллистических ракет. Вероятно, речь идет и о программах мер противодействия соперника. Хотя испытательные полеты с умеренно сложными мерами противодействия, вероятно, будут необходимы, наблюдение за ними может оказаться затруднительным – вспомните запуск Северной Кореей 31 августа 1998 года ракеты "Теподонг-1", когда была предпринята попытка вывести спутник на орбиту. Неспособность определить, было ли это запуском спутника, как изначально утверждала Северная Корея, или испытание баллистической ракеты, высвечивает трудности в обеспечении четкого слежения, когда хотелось бы наблюдать разработку мер противодействия, особенно для ракет малой и средней дальности, если даже американское разведывательное сообщество было заранее уведомлено о запуске.
16. Uzi Rubin and Azriel Lorber, "Future Trend of Missile Proliferation in the Middle East and its Impact on Regional Missile Defense," *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (Доклад на конференции АИАА по ПРО на ТВД, Лондон, Англия, 1995 г.).
17. Michael C.Sirak, "In NMD Test, Beacon Will Help Position EKV Until Booster Release," *Inside Missile Defense* 5:9 May 1999):20.
18. Michael C.Sirak, "DOD, Industry: NMD Countermeasures Getting Attention," *Inside Missile Defense* 5:10 (May 1999):1.
19. Приблизительные методы нахождения оптимального распределения перехватчиков между разными слоями многослойной обороны приведены в работе M.V.Finn and G.A.Kent, *Simple Analytic Solutions To Complex Military Problems*, N-21111-AF. Santa Monica, CA: RAND Corporation. (August 1985):33-38.
20. Michael C.Sirac, "BMDO:NMD 'C3' Architecture Could Feature Up to Nine X-band Radars," *Inside Missile Defense* 5:10 (May 1999):13-14.
21. Dean A.Wilkening, "ABM Treaty Compliance: Past Concerns and Future Debates," in eds. Michael Moody and Amy Sands, *Compliance with Arms Control and Nonproliferation Agreements: Closing the Conceptual and Policy Gaps* (готовится к выпуску).
22. Использование большого числа перехватчиков на каждую налетающую цель приводит к нагрузкам на систему команд и контроля НПРО, поскольку надо управлять каждым перехватчиком до его прихода в точку перехвата. Кроме того, если более одного перехватчика НПРО маневрируют на конечном участке сближения, датчик последующего перехватчика может ошибочно принять предыдущий перехватчик за цель. Наконец, желание не потратить зря слишком большое число перехватчиков на приближающиеся сначала цели в случае последовательного развития атаки приводит к тенденции ограничить число перехватчиков, которое оборона будет выделять на каждую цель, если допустить преднамеренное развитие нападения.
23. Мотивация этого примера исходит из факта, что на каждой боеголовке ПЛРБ "Полярис" во время английской программы "Шевалайн" в 80-х гг., наверное, было установлено по две усложненные ложные цели наряду с другими мерами противодействия для увеличе-

- ния возможности проникновения через систему ПРО Москвы. R.Norris, A.Burrows, and R.Fieldhouse, "British, French, and Chinese Nuclear Weapons," *Nuclear Weapons Databook*, Westview Press, V(1994):105-113.
24. R.Shaver, Priorities for Ballistic Missile Defense, " in *New Challenges for Defense Planning: Rethinking How Much Is Enough*, ed. Paul Davis. (Santa Monica, CA: RAND, 1994):280-281.
 25. Department of Defense, *Report to Congress on Theater Missile Defense Architecture Options for the Asia-Pacific Region*, (1999). [<http://www.fas.org/spp/starwars/program/tmd050499.htm>].
 26. Michael A.Dorenheim, "Theater Wide' Missile Defense: Appealing, Controversial, Difficult," *Aviation Week and Space Technology* , (1997):62; смотрите также предыдущую ссылку.
 27. Teal Group Corporation, THAAD. *World Missiles Briefing* .(Fairfax: VA, 1996).6.
 28. Оценка в 2-4 часа для номинального срока перезагрузки "Скада" принадлежит Т.Кохрену и др., *Nuclear Weapons Databook, Vol.IV: Soviet Nuclear Weapons*. (Washington, D.C: NRDC, 1989).221.
 29. *Jane's Strategic Weapons Systems* 19 (Сентябрь 1995); D. Isby, *Jane's Intelligence Review* 7:3 (Март 1995):115-117.
 30. Перед войной 1991 года в Персидском заливе у Ирака было примерно 220 ракет «Эль Хуссейн» и 14 мобильных пусковых установок (примерно по 15 ракет на установку). См. первую статью в [4]. Максимальное число запущенных в течение одного дня ракет составило 14 (то-есть 6% от их полного числа), хотя средние темпы ежедневных пусков упали втрое (с 4.7 до 1.5 %) после того, как США начали охоту за "Скадами".
 31. В общем случае, полное число перехватчиков, которые необходимо разместить для обороны от массированных атак, определяется умножением числа перехватчиков, данного на рис.7, на $(S+M-1)/M$, где S – число площадок TMD, необходимых для полного покрытия и M – число баллистических ракет на одну мобильную пусковую установку в арсенале.
 32. Для обсуждения постоянной (заградительной), произвольной и корректировочной огневых доктрин см. J.S. Przemieniecki, *Mathematical Methods in Defense Analysis*, 2nd edition. (Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994), 154-159.
 33. Могут быть рассмотрены более сложные предпочтительные стратегии нападения и обороны. Однако, такие сложности моделирования не оказывают значительного влияния на размер обороны, который можно вычислить с помощью метода постоянных атак на постоянную оборону. N.K. Jaiswal, *Military Operations Research: Quantitative Decision Making* (Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997). 169-172.
 34. Данный подход был первоначально предложен Дэвидом Ваганом. Для похожего рассмотрения, не включающего ложные цели, см. E. Larson and G. Kent, *A New Methodology for Accessing Multilayer Missile Defense Options*, MR-390-AF, (Santa Monica, CA:RAND, 1994), 12-16.