

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННО ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ ОТ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ С ПОЛУАКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ НАВЕДЕНИЕМ

А.Н. Катунин

(представил д.т.н., проф. Г.Н. Доля)

Предложен метод защиты наземных целей от высокоточного оружия с полуактивным лазерным наведением на основе применения укрытий с дифракционно отражающими покрытиями. Проведено предварительное оценивание эффективности применения укрытий с данным видом покрытий для снижения вероятности правильного обнаружения целей лазерной головкой самонаведения боеприпаса.

Опыт ведения боевых действий свидетельствует о постоянно возрастающей роли высокоточного оружия (ВТО) в вооруженных конфликтах без применения оружия массового поражения. При этом анализ боевых операций «Буря в пустыне», «Лис пустыни», «Решительная сила», проводимых войсками НАТО, показал, что уничтожение образцов вооружения и военной техники (ВВТ) в укрытиях и на огневых позициях противника обеспечивает решение поставленных оперативно-стратегических задач в кратчайшее время с наименьшими потерями. Эффективное уничтожение образцов ВВТ обеспечивается боевыми элементами ВТО, имеющими высокую точность поражения наземных целей с высокой степенью защиты. По данной причине особая роль при ведении широкомасштабных боевых действий отводится комплексам ВТО с полуактивным лазерным наведением, образцы которого способны пробивать перекрытия фортификационных сооружений толщиной до 3 м и характеризуются точностью попадания до 97 % [1]. Данные образцы вооружения имеют высокую эффективность при относительно малой стоимости, что обусловило их широкое использование в локальных вооруженных конфликтах, а также в ходе миротворческих и антитеррористических миссий.

Одним из возможных методов защиты от ВТО с полуактивным лазерным наведением является применение дифракционно отражающих покрытий (ДОП) [2]. В конструктивном отношении ДОП представляют собой комбинацию слоисто неоднородных и геометрически неоднородных в общем случае диэлектрических покрытий. В качестве геометрически неоднородного элемента покрытия возможно использование дифракционных решеток на основе рельефно-фазовых структур (фазовых дифракционных решеток), для которых в настоящее время наиболее успешно разработаны методы изготовления.

Принцип применения ДОП основан на возможности сосредоточения

значительной части мощности (более 70 %) оптического излучения подсвета цели в узком угловом секторе (главном дифракционном максимуме) [3], при этом в угловых секторах, отличных от направления распространения главного дифракционного максимума диаграммы рассеяния покрытия, будет наблюдаться значительное (~ 10 раз) снижение интенсивности рассеянного структур лазерного излучения [2]. При соответствующих параметрах ДОП направление распространения главного дифракционного максимума диаграммы рассеяния будет совпадать с направлением на подстилающую поверхность, что обеспечит формирование на ней ложной цели – светового пятна. Таким образом, выявляется перспективность применения таких покрытий для укрытий наземных целей, которая определяется тем фактом, что ДОП может одновременно использоваться как малоотражающее покрытие для укрытий наземных образцов ВВТ (пассивный метод защиты от ВТО, основанный на принципе уменьшения информации), а также как средство формирования ложных целей на подстилающей поверхности (пассивный метод защиты от ВТО, основанный на смещении точки наведения самонаводящегося боеприпаса).

Следует отметить, что применение ДОП эффективно при использовании нападающей стороной только средств ВТО с полуактивным лазерным наведением, так как укрытие с ДОП не является эффективным средством защиты от ВТО с телевизионными, радиоэлектронными, а также визуальными средствами наведения. Для защиты целей от средств ВТО, оснащенных различными типами систем наведения, необходимо комплексное использование различных методов противодействия ВТО, что предполагает следующие способы применения ДОП на укрытиях:

- активизация ДОП на укрытии с динамическими параметрами конструкции (динамическом укрытии) при сигнале, формируемом лазерным детектором при обнаружении наличия лазерного сигнала подсвета укрытия;
- одновременное применение динамического укрытия с ДОП в комплексе с другими методами защиты, эффективными для защиты целей от средств ВТО, оснащенных системами наведения, отличными от полуактивной лазерной.

Один из путей реализации первого способа приведен на рис. 1. Как показано на рисунке, укрытие содержит 2 типа покрытий: маскирующее (активное постоянно) и ДОП (активируемое в момент применения противником самонаводящихся боеприпасов с полуактивным лазерным наведением). Изменяемая конструкция укрытия позволяет формировать ложную цель – световое пятно на подстилающей поверхности на определенном расстоянии, превышающем радиус поражения высокоточного боеприпаса, в зависимости от углового положения боеприпаса.

Второй способ предполагает применение динамического укрытия с постоянно активным ДОП и задействование различного рода ложных целей, дымов и аэрозолей, станций противодействия при использовании противником боеприпасов с системами наведения, отличными от полуактивной лазерной. Данный подход уместен при наличии априорной инфор-

мации о высокой вероятности применения противником средств ВТО с лазерным наведением, так как на укрытии постоянно активно только ДОП.

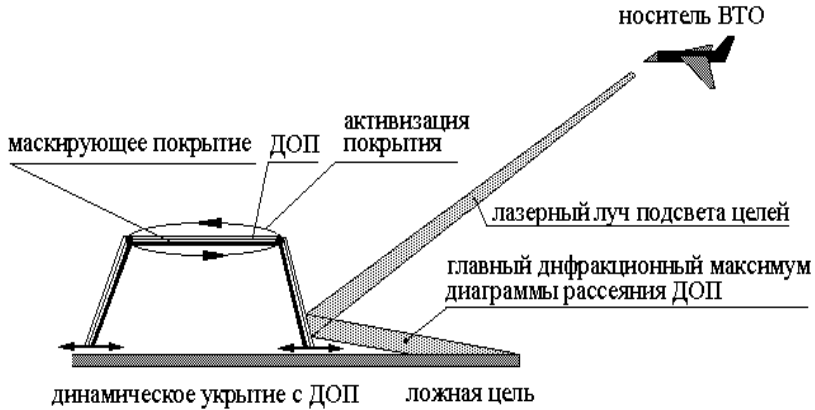


Рис. 1. Вариант применения ДОП на укрытиях

В качестве критерия эффективности рассмотрим вероятность правильного обнаружения укрытия образцов ВВТ лазерной головкой самонаведения при условии совмещенного приемопередатчика. Проведем оценки для укрытий с маскирующим покрытием и динамического укрытия с ДОП.

Для лазерных головок самонаведения, оснащенных фотоприемниками с внутренним фотоэффектом, вероятность правильного обнаружения цели определяется выражением [4]:

$$D = 0,5 - \Phi_0 \left(\frac{n_0 - \langle n_{II} \rangle - \langle n_C \rangle}{\sqrt{\langle n_{II} \rangle + \langle n_C \rangle}} \right), \quad (1)$$

где $\langle n_C \rangle$ – среднее число фотоэлектронов, соответствующее сигнальной составляющей выходного тока фотоприемника; $\langle n_{II} \rangle$ – среднее число фотоэлектронов, соответствующее помеховой составляющей выходного тока фотоприемника; n_0 – пороговое число фотоэлектронов; $\Phi_0(x)$ – интеграл вероятности, задаваемый соотношением

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2/2} dt. \quad (2)$$

Значение $\langle n_C \rangle$ за интервал времени наблюдения τ составляет

$$\langle n_C \rangle = \frac{S_\lambda \cdot P_C \cdot \tau}{e}, \quad (3)$$

где S_λ – спектральная чувствительность фотоприемника; P_C – мощность оптического сигнала, поступающего на вход фотоприемника системы

наведения боеприпаса от подсвечиваемой цели; $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

При обнаружении укрытия с маскирующим покрытием среднее число помеховых фотоэлектронов определяется средним числом фотоэлектронов, определяемым фоновой составляющей выходного тока, и средним числом фотоэлектронов темнового тока фотоприемника [4]:

$$\langle n_{\Phi} \rangle = \frac{\Phi_{\Phi} \cdot S_{\text{ИНТ}} \cdot \tau}{e}; \quad (4)$$

$$\langle n_{\Gamma} \rangle = \frac{i_{\Gamma} \cdot \tau}{e}, \quad (5)$$

где Φ_{Φ} – световой поток, обусловленный фоном на входе фотоприемника; $S_{\text{ИНТ}}$ – интегральная чувствительность фотоприемника; i_{Γ} – помеховая составляющая выходного тока фотоприемника, обусловленная тепловым током.

В случае обнаружения динамического укрытия с ДОП среднее число помеховых фотонов возрастет по причине наличия на подстилающей поверхности ложной цели – светового пятна, тогда среднее число фотоэлектронов, соответствующих помеховой составляющей выходного тока фотоприемника, увеличивается на

$$\langle n_{\text{ЛЦ}} \rangle = \frac{S_{\lambda} \cdot P_{\text{ЛЦ}} \cdot \tau}{e}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ЛЦ}}$ – мощность оптического сигнала, поступающего на вход фотоприемника системы наведения боеприпаса от светового пятна на подстилающей поверхности.

При проведении расчетов зададимся вероятностью ложной тревоги

$$F = 0,5 - \Phi_0 \left(\frac{n_0 - \langle n_{\Pi} \rangle}{\sqrt{\langle n_{\Pi} \rangle}} \right) = 10^{-3}. \quad (7)$$

Также для простоты будем полагать, что обнаружение проводится при отсутствии фоновых помех, и среднее значение помеховых фотоэлектронов определяется только тепловым шумом фотоприемника. В качестве фотоприемника рассмотрим фотодиод ФД-141К, область спектральной чувствительности которого составляет 0,4...1,1 мкм, интегральная чувствительность – $S_{\lambda} = 0,2$ А/Вт, значение теплового тока – $i_{\Gamma} \sim 7$ мкА. Интервал времени наблюдения примем $\tau = 50$ нс, который соответствует длительности импульса подсвета целей станцией «Прожектор». Для принятых предположений величина порога n_0 для обеспечения вероятности ложной тревоги 10^{-3} составляет $\sim 2,1921 \times 10^6$. Расчеты, выполненные на основании формул (1), (2) и (5), показывают, что для обеспечения значения вероятности правильного обнаружения $D = 0,999$ необходимо наличие ~ 9180 сигнальных фотоэлектронов.

В случае обнаружения укрытия с маскирующим покрытием значение среднего числа сигнальных фотоэлектронов определяется мощностью оптического излучения, отраженного от укрытия и падающего на приемник лазерной головки самонаведения [5]:

$$P_{C_УК} = \frac{\pi \cdot P_{ИЗЛ} \cdot D_{ПР}^2}{4 \Omega_{ИЗЛ} \cdot R^4} \cdot \tau_{ПЕР} \cdot \tau_{ПР} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \sigma_{Ц}, \quad (8)$$

где $P_{ИЗЛ}$ – мощность, излучаемая лазером станции подсвета; $D_{ПР}$ – диаметр приемника; $\tau_{ПЕР}$ – коэффициент пропускания оптического тракта передатчика; $\tau_{ПР}$ – коэффициент пропускания оптического тракта головки самонаведения боеприпаса; T_1 – коэффициент прозрачности атмосферы при распространении излучения от станции подсвета до укрытия; T_2 – прозрачность атмосферы на трассе приема оптического излучения; $\sigma_{Ц}$ – поперечное сечение подсвечиваемого участка укрытия; $\Omega_{ИЗЛ}$ – телесный угол передающего луча ($\pi \Delta \omega^2 / 4$ при ширине передающего луча лазера $\Delta \omega^2$); R – расстояние от станции подсвета целей до укрытия (расстояние от укрытия до боеприпаса).

В свою очередь поперечное сечение диффузно отражающего подсвечиваемого участка цели (укрытия с маскирующим покрытием) определяется как

$$\sigma_{Ц} = \frac{S \cdot R_{ОТ}}{\pi}, \quad (9)$$

где S – площадь подсвечиваемого и наблюдаемого участка укрытия (для протяженной цели соответствует $\pi R^2 \Delta \omega^2 / 4$ при ширине передающего луча лазера $\Delta \omega^2$); $R_{ОТ}$ – энергетический коэффициент отражения излучения от маскирующего покрытия.

Для дальнейших оценок примем, что укрытие с маскирующим покрытием, характеризующимся энергетическим коэффициентом отражения 0,1, подсвечивается станцией подсвета целей «Прожектор», расположенной на носителе самонаводящихся боеприпасов. При этом $P_{ИЗЛ} = 5,6$ МВт (значение импульсной мощности станции подсвета целей «Прожектор», функционирующей на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм); $\tau_{ПЕР} = \tau_{ПР} = 0,5$; $T_1 = T_2 = 0,5$; $\Omega_{ИЗЛ} = 8 \times 10^{-9}$ рад². Данные предположения и принятые упрощения практически соответствуют схеме применения управляемых боеприпасов с полуактивной лазерной системой наведения.

Результаты проведенных по формулам (8) и (9) расчетов показывают, что обнаружение укрытия с маскирующим покрытием происходит на дальностях, не превышающих $R \sim 12,2$ км.

В свою очередь поперечное сечение укрытия с ДОП, согласно определению [5], будет определяться соотношением:

$$\sigma_{ДОП} = \frac{R_{ОТ}}{4 \lambda^2} \cdot S_{ДОП}^2, \quad (10)$$

где S – площадь обратного отражения ДОП.

Определение величины поперечного сечения поверхностей с ДОП представляет собой отдельную важную научно-инженерную задачу и в данной статье рассматриваться не будет.

Для соответствующих оценок примем, что формируемая ДОП ложная цель формируется на расстоянии, значительно меньшем расстояния от динамического укрытия до самонаводящегося боеприпаса, и различием в длинах трасс “укрытие – боеприпас” и “ложная цель – боеприпас” при соответствующих расчетах можно пренебречь. Данное положение реализуется соответствующими параметрами используемого ДОП, а также возможностью изменения положения поверхностей динамического укрытия (обеспечение оптимального угла падения на ДОП).

Воспользуемся результатами экспериментальных исследований, проведенных в [2], где показано, что применение голографических ДОП обеспечивает снижение интенсивности отраженного оптического излучения в ~ 10 раз по сравнению с диффузно отражающей поверхностью в угловых секторах, отличных от направления распространения главных дифракционных максимумов, при практически совпадающих энергетических коэффициентах отражения.

Так как при расчетах энергетический коэффициент укрытия с маскирующим покрытием полагался достаточно малым (0,1), а фазовые ДОП имеют металлизированную отражающую поверхность с $R_{OT} = 0,8 \dots 0,9$, то в первом приближении справедливым будет предположение, что количество сигнальных фотоэлектронов в случае обнаружения динамического покрытия с ДОП на рассчитанном ранее расстоянии $R \sim 12,2$ км будет мало отличаться от количества сигнальных фотоэлектронов, соответствующих обнаружению укрытия с маскирующим покрытием. В свою очередь, количество помеховых фотоэлектронов, обусловленных наличием ложной цели – светового пятна на подстилающей поверхности, определяется мощностью оптического излучения, рассеиваемого ложной целью. Согласно утверждениям [3], ДОП обеспечивают концентрацию энергии в определенном направлении (в направлении распространения главного дифракционного максимума) более 70 %. В предположении, что подстилающая поверхность является диффузно рассеивающей с энергетическим коэффициентом отражения 0,1, среднее количество помеховых фотоэлектронов увеличится на величину $\langle n_{\text{ЛЦ}} \rangle \cong 0,7 \langle n_c \rangle$ при условии, что ложная цель попадает в поле зрения лазерной головки самонаведения и коэффициент прозрачности атмосферы при распространении излучения на трассе “динамическое укрытие с ДОП – головка самонаведения боеприпаса” мало отличается от коэффициента прозрачности атмосферы на трассе “укрытие – ложная цель – лазерная головка самонаведения”.

При принятых допущениях для ранее рассчитанного порога обнаружения ($n_0 \sim 2,1921 \times 10^6$), значительно возрастает вероятность ложной тревоги (с 10^{-3} до 0,886). Вероятность правильного обнаружения динамического покрытия лазерной головкой самонаведения при условии

наличия помеховых фотоэлектронов, обусловленных наличием ложной цели – светового пятна на подстилающей поверхности, снижается с 0,999 до 0,110 для порога $n_0 \sim 2,1921 \times 10^6$.

Полученные оценки свидетельствуют о высокой эффективности применения ДОП как покрытия для динамических укрытий. При этом стоит отметить, что в работе получены достаточно приближенные оценки, так как в [2] использовались достаточно простые фазовые покрытия с невысокой стоимостью. В реальных условиях применения ДОП типа «эшелетт», по-видимому, будет наблюдаться также резкое снижение среднего числа сигнальных фотоэлектронов, так как данный вид ДОП характеризуется высокой дифракционной эффективностью.

Наиболее общее заключение о перспективности использования динамических укрытий с ДОП можно получить на основе интегральных оценок систем обнаружения:

$$D_{ИИТ} = \frac{I}{R_B \cdot \Omega_B} \cdot \iint_{R_B, \Omega_B} D(R_B, \Omega_B) \cdot dR_B d\Omega_B ; \quad (11)$$

$$F_{ИИТ} = \frac{I}{R_B \cdot \Omega_B} \cdot \iint_{R_B, \Omega_B} F(R_B, \Omega_B) \cdot dR_B d\Omega_B , \quad (12)$$

где R_B – диапазон дальностей возможного положения боеприпасов с пассивной лазерной системой наведения; Ω_B – диапазон возможных угловых положений самонаводящихся боеприпасов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широкопад А.Б. *История авиационного вооружения*. – Минск: Харвест, 1999. – 560 с.
2. Доля Г.М., Катунин А.Н. *О возможности снижения заметности целей при защите от высокоточного оружия (ВТО) на основе использования дифракционно отражающих покрытий // Збірник наукових праць ХВУ. – 2000. – № 2(18). – С. 75 – 81.*
3. Нагибина И.М., Прокофьев В.К. *Спектральные приборы и техника спектроскопии*. – Л.: Машиностроение, 1967. – 324 с.
4. Москвитин С.В., Стрелков А.И. *Теоретические основы оптической локации: конспект лекций*. – Х.: ХВУ, 1992. – 368 с.
5. *Справочник по инфракрасной технике: В 4 т. / Под ред. У. Волфа, Г. Цисиса*. – Т. 4. *Проектирование инфракрасных систем*. – М.: Мир, 1999. – 472 с.

Поступила 5.11.2002

Катунин Альберт Николаевич, зам. отв. редактора редакции научно-практического журнала «Вісник Військ ППО». В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов – применение дифракционных покрытий в задачах снижения заметности объектов.